

# **Sistemas de Refrigeração em Supermercados - *Benchmarking* Energético**

**Edifícios Saudáveis Consultores**

*Diogo Moreira Barros*

**Dissertação do MIEM**

Orientador na FEUP: Prof. Armando Oliveira

Orientador na empresa Edifícios Saudáveis: Engº João Santos



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

julho 2015



## Resumo

O sistema de frio é o maior consumidor de energia nos supermercados. Com o objetivo de minimizar os consumos provocados por este sistema, têm-se desenvolvido ao longo dos tempos, diversos estudos em torno da eficiência energética neste tipo de edifícios. No entanto, nem sempre é fácil comparar o desempenho destes sistemas em diferentes supermercados com indicadores convencionais. O objetivo deste trabalho é criar um indicador que permita fornecer informação sobre o consumo energético do sistema de frio de um supermercado e, por comparação a outros, conseguir perceber o quão eficiente ou não é - *benchmarking*.

Para tal, desenvolveu-se um modelo de cálculo que permite obter esse indicador, a desagregação dos vários consumos elétricos anuais dos vários componentes que constituem a rede de frio de um supermercado, bem como as várias necessidades térmicas anuais exigidas por cada circuito. Na realização do modelo consideraram-se os vários tipos de móveis de frio existentes no mercado, desagregando, para cada um deles, os vários ganhos que contribuem para a carga térmica total a remover (ganhos internos e referentes ao espaço). De forma análoga, consideraram-se também os dois tipos de ganhos no cálculo da carga térmica das câmaras. Tendo em conta as necessidades térmicas anuais exigidas, calcula-se a potência térmica necessária dos compressores para cada circuito, bem como o respetivo consumo elétrico anual. Por fim, de forma análoga aos compressores é possível obter o consumo elétrico dos condensadores.

Com a realização deste trabalho conclui-se que o modelo desenvolvido é uma ferramenta importante e inovadora que permite avaliar o desempenho energético da rede de frio de um supermercado. Os resultados obtidos na aplicação do modelo a dois casos reais indicam que o modelo desenvolvido é uma boa aproximação do cálculo do indicador, bem como dos consumos elétricos anuais.

**Palavras-chave:** Refrigeração, eficiência energética, carga térmica, consumo elétrico, *benchmarking*.



## Abstract

The cooling system is the biggest energy consumer in supermarkets. In order to minimize the consumption caused by this system, it has been developed over the years several studies on energy efficiency in this type of buildings. It is not always easy to compare the performance of these systems in different supermarkets with conventional indicators. The goal of this project is to create an indicator that can provide an indication of the energy consumption of the cooling system of a supermarket and be able to in comparison to others, understand how efficient it is or not – *benchmarking*.

For this purpose, it has been developed a calculation template which provides that indicator, the disaggregation of the various annual electrical consumptions of the several components which make up the cooling chain of a supermarket, as well as the various annual heating necessities required by each circuit. In the embodiment of the template were considered several types of cooling furnishings existent in the market, disaggregating, for each of them, the various gains that contribute to the removing total heating load (internal gains related to space). Analogously, it is also considered two kinds of gains in the calculation of the total heating load of the chambers. Taking into consideration the required annual heating necessities, it is calculated the necessary heating power of the compressors to each circuit, as well as the respective annual electrical consumption. Finally, similarly to the compressors, it is possible to obtain the electrical consumption of the air cooled condensers.

By making this project, we can conclude that the developed template is an important and innovative tool which allows us to evaluate the energy performance of the cooling chain of a supermarket. The results obtained in the application of the template to two real cases, indicate that the developed template is an accurate approximation of the indicator's calculation, as well as of the annual electrical consumption.

**Keywords:** Refrigeration, energy efficiency, heating load, electric consumption, *benchmarking*.



## Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à empresa Edifícios Saudáveis Consultores a oportunidade da realização da dissertação de final de curso. Agradeço a todos os colaboradores da empresa, com especial atenção ao Engº Ricardo Sá e ao Engº João Santos que, como orientadores, sempre me apoiaram e ajudaram em tudo que necessitei.

Agradeço também, ao meu orientador da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Professor Armando Oliveira, pela disponibilidade, apoio, sugestões e críticas construtivas no decurso deste trabalho.

Um especial agradecimento à Sandra Reis, Carla Fernandes, Inês Louzada, Ana Louzada e Liliana Relva, por todas as ajudas imprescindíveis que me deram na elaboração do trabalho.

Por último, um agradecimento muito especial à minha família, amigos e namorada pelo apoio, força e companhia nos bons e maus momentos.





## Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação.....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Estrutura da dissertação .....	3
1.4	Apresentação da empresa.....	3
2	Revisão Bibliográfica .....	5
2.1	Ciclo Frigorífico.....	5
2.2	Supermercados .....	8
2.2.1	Sistema de frio .....	8
2.2.2	Equipamentos .....	10
2.2.3	Cargas Térmicas .....	19
2.2.4	Controlo .....	23
2.2.5	Indicador de desempenho: <i>Benchmarking</i> .....	24
3	Estabelecimento de correlações para o consumo da rede de frio .....	25
4	Elaboração do modelo .....	31
4.1	Pressupostos, variáveis e parâmetros usados .....	31
4.1.1	Variáveis .....	31
4.1.2	Cargas Térmicas .....	32
4.1.3	Central .....	34
4.1.4	Outros Parâmetros .....	35
4.2	Metodologia de cálculo .....	36
5	Caso de estudo- Aplicação do modelo.....	45
5.1	Caso A.....	45
5.1.1	Resultados.....	45
5.1.2	Análise de Resultados.....	49
5.1.3	Medidas de melhoramento.....	51
5.2	Caso B.....	52
5.2.1	Resultados.....	52
5.2.2	Análise de Resultados.....	56
6	Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros .....	59
	Referências .....	61
	ANEXO A: Interface do modelo .....	63
	ANEXO B: Correlações obtidas para a realização do modelo .....	73



## Siglas

C-*Combi*

CO<sub>2</sub>- Dióxido de carbono

COP- Coeficiente de *performance*

EER- Relação de eficiência energética

ESC- Edifícios Saudáveis Consultores

HCP- Movél horizontal com porta

HSP- Movél horizontal sem porta

LED- *Light Emitting Diode*

VCP- Movél Vertical com porta

VSP- Movél Vertical sem porta

VT-Vitrina



## Índice de Figuras

Figura 1 - Desagregação dos principais consumos de um supermercado tipo (Silva 2012) .....	2
Figura 2 - Diagrama do funcionamento de uma máquina frigorífica (Mesquita 2009). ....	5
Figura 3 - Ciclo de compressão a vapor (Trane). ....	6
Figura 4 - Diagrama de <i>Mollier</i> (Trane). ....	6
Figura 5 - Ciclo frigorífico com permutador calor interno (Afonso 2008). ....	7
Figura 6 - Ciclo frigorífico de compressão de vapor real (Afonso 2008). ....	8
Figura 7 - Estrutura da rede de frio de um supermercado típico. ....	9
Figura 8 - Circuito de refrigeração de um supermercado típico (Goetzler, Goffri et al. 2009)..	9
Figura 9 - Condensador arrefecido a ar (Trane). ....	12
Figura 10 - Evaporador inundado (Martinelli 2011). ....	13
Figura 11 - Evaporador para arrefecer ar (Trane). ....	14
Figura 12 - Pressões na válvula termostática (EMERSON Technologies 2006). ....	15
Figura 13 - Explicação da pressão de entrada (EMERSON Technologies 2006). ....	16
Figura 14 - Semi-mural (Névé 2011). ....	16
Figura 15 - Mural com portas (Névé 2011). ....	16
Figura 16 - Mural sem portas (Névé 2011) . ....	17
Figura 17 - Vitrina (Névé 2011). ....	17
Figura 18 - Ilha com porta (Névé 2011). ....	17
Figura 19 - Mural com porta (Névé 2011). ....	17
Figura 20 - <i>Combi</i> (Névé 2011). ....	18
Figura 21 - Cortina de ar de um expositor vertical (ASHRAE 2014). ....	21
Figura 22 - Circulação do ar de um expositor vertical (ASHRAE 2014). ....	21
Figura 23 - Desagregação das cargas térmicas nos móveis. ....	22
Figura 24 - Desagregação das cargas térmicas nas câmaras. ....	22
Figura 25 - Diferenças da pressão de evaporação utilizando controlo por flutuação (Danfoss 2012). ....	23
Figura 26 - Correlação entre o consumo real diário e a dimensão da rede. ....	28
Figura 27 - Correlação entre o consumo real diário por unidade de comprimento e os Graus-Dia de arrefecimento para uma temperatura base de -30 °C. ....	28
Figura 28 - Correlação entre o consumo real diário por unidade de comprimento e os Graus-Dia de arrefecimento para uma temperatura base de 0 °C. ....	28
Figura 29- Representação da metodologia de cálculo do consumo elétrico anual. ....	36
Figura 30 - Percentagem dos consumos elétricos anuais obtidos no caso A. ....	46
Figura 31 - Desagregação dos consumos elétricos anuais obtidos para os dois circuitos no caso A. ....	47
Figura 32 - Desagregação dos consumos elétricos anuais dos móveis obtidos para os dois circuitos no caso A. ....	47

Figura 33 - Desagregação dos consumos elétricos anuais das câmaras obtidos para os dois circuitos no caso A. ....	47
Figura 34 - Percentagem das necessidades térmicas anuais obtidos no caso A. ....	48
Figura 35 - Desagregação dos ganhos nos móveis do circuito positivo obtidos para o caso A. ....	48
Figura 36 - Desagregação dos ganhos nos móveis do circuito negativo obtidos para o caso A. ....	49
Figura 37 - Evolução diária da carga térmica de um móvel nas várias estações do ano para o caso A. ....	49
Figura 38 - Percentagem dos consumos elétricos anuais obtidos no caso B. ....	53
Figura 39 - Desagregação dos consumos elétricos anuais obtidos para os dois circuitos no caso B. ....	54
Figura 40 - Desagregação dos consumos elétricos anuais dos móveis obtidos para os dois circuitos no caso B. ....	54
Figura 41 - Desagregação dos consumos elétricos anuais das câmaras obtidos para os dois circuitos no caso B. ....	54
Figura 42 - Percentagem das necessidades térmicas anuais obtidos no caso B. ....	55
Figura 43 - Desagregação dos ganhos nos móveis do circuito positivo obtidos para o caso B. ....	55
Figura 44 - Desagregação dos ganhos nos móveis do circuito negativo obtidos para o caso B. ....	56
Figura 45 - Evolução diária da carga térmica de um móvel nas várias estações do ano para o caso B. ....	56
Figura 46 - Interface do modelo- <i>Inputs</i> . ....	63
Figura 47 - <i>Inputs</i> : Seleção da classe climática. ....	64
Figura 48 - <i>Inputs</i> : Seleção da cortina noturna. ....	64
Figura 49 - <i>Inputs</i> : Seleção da iluminação dos móveis. ....	64
Figura 50 - <i>Inputs</i> : Seleção do tipo de ventiladores dos móveis. ....	64
Figura 51 - <i>Inputs</i> : Seleção do tipo de controlo da temperatura de condensação. ....	65
Figura 52 - <i>Inputs</i> : Seleção do tipo de compressor. ....	65
Figura 53 - Fator de correção para os móveis em função da temperatura do interior da loja. ....	73
Figura 54 - Fator de correção para os móveis do tipo <i>combi</i> em função da temperatura do interior da loja. ....	74
Figura 55 - Fator de correção para os móveis do tipo vertical sem porta em função da temperatura do interior da loja. ....	74
Figura 56 - Correlação obtida para o COP utilizando um compressor do tipo parafuso em função da temperatura de condensação para o circuito de positivos. ....	75
Figura 57 - Correlação obtida para o COP utilizando um compressor do tipo parafuso em função da temperatura de condensação para o circuito de negativos. ....	75
Figura 58 - Correlação obtida para o COP utilizando um compressor do tipo pistão em função da temperatura de condensação para o circuito de positivos. ....	76

Figura 59 - Correlação obtida para o COP utilizando um compressor do tipo pistão em função da temperatura de condensação para o circuito de negativos.....	76
Figura 60 - Correlação obtida para a eficiência de um condensador em função do $\Delta T$ .....	77





## Índice de Tabelas

Tabela 1- Fatores corretivos para o móvel do tipo <i>combi</i> .....	20
Tabela 2 - Dados recolhidos em várias auditorias .....	25
Tabela 3 - Consumo diário das várias lojas .....	26
Tabela 4 - Graus-Dia para as diferentes localizações .....	27
Tabela 5 - Percentagens dos comprimentos de cada móvel .....	32
Tabela 6 - Percentagens dos volumes de cada câmara .....	32
Tabela 7 - Classes climáticas.....	34
Tabela 8 - Metodologia de cálculo das cargas térmicas para os móveis .....	39
Tabela 9 - Metodologia de cálculo das necessidades e dos consumos elétricos anuais dos móveis.....	39
Tabela 10 - Metodologia de cálculo do consumo elétrico anual dos compressores.....	42
Tabela 11 - Metodologia de cálculo do consumo elétrico anual dos condensadores .....	43
Tabela 12 - Dados da loja situada no centro do país .....	45
Tabela 13 - Resultados obtidos no caso A.....	45
Tabela 14 - Consumos elétricos obtidos o caso A.....	46
Tabela 15 - Necessidades térmicas anuais obtidas no caso A .....	46
Tabela 16 - Resultados obtidos das medidas de melhoramento do caso A .....	51
Tabela 17 - Consumos elétricos obtidos com as medidas de melhoramento do caso A .....	51
Tabela 18 - Necessidades térmicas anuais obtidas com as medidas de melhoramento do caso A .....	51
Tabela 19 - Dados da loja situada no norte do país .....	52
Tabela 20 - Resultados obtidos no caso B .....	52
Tabela 21 - Consumos elétricos obtidos o caso B .....	53
Tabela 22 - Necessidades térmicas anuais obtidas no caso B .....	53
Tabela 23 - <i>Outputs</i> : Necessidades térmicas .....	65
Tabela 24 - <i>Outputs</i> - Consumos elétricos.....	66
Tabela 25 - <i>Outputs</i> : COP médio anual e <i>benchmarking</i> .....	66
Tabela 26 - <i>Outputs</i> : contribuição dos vários equipamentos para o consumo elétrico anual...	66
Tabela 27 - Cálculo cargas térmicas horárias semi-murais .....	67
Tabela 28 - Resultados para os vários tipos de móveis .....	67
Tabela 29 - Cálculo cargas térmicas horárias <i>combis</i> .....	67
Tabela 30 - Cálculo cargas térmicas horárias câmara congelados .....	68
Tabela 31 - Resultados para os vários tipos de câmaras.....	68
Tabela 32 - Temperaturas para o cálculo do COP e da eficiência do condensador. ....	69
Tabela 33 - Cálculo dos vários consumos horários da central .....	69

Tabela 34 - Cálculo temperatura interior da loja- <i>Peak shaving</i> .....	70
Tabela 35 - Comprimentos dos móveis .....	70
Tabela 36 - Volumes das câmaras .....	70
Tabela 37 - Fatores de correção para as classes climáticas de referência e I .....	71
Tabela 38 - Fatores de correção para as classes climáticas II e III.....	71
Tabela 39 - Fatores de correção para a classe climática <i>peak shaving</i> .....	71

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento do projeto e motivação

A Revolução Industrial e o crescimento das cidades levaram a que a população tivesse diferentes necessidades. Como consequência, surgiram novos produtos e assim novas lojas que possibilitam a distribuição mais facilitada destes. Aparecem os supermercados e hipermercados, que são grandes superfícies de autosserviço, onde se pode encontrar, por exemplo, todo o tipo de artigos de alimentação a serem comercializados, necessitando de sistemas de frio para poder conservar os produtos, enquanto armazenados e expostos para serem vendidos (Silva 2012).

Devido também a este crescimento, a população ficou muito dependente da energia, vivendo ao redor dela. Esta é obtida essencialmente através de combustíveis fósseis, que para além de provocarem um enorme impacto ambiental, têm reservas finitas, criando nos últimos anos guerras económicas, bem como problemas ambientais relacionados com as alterações climáticas preocupantes. Uma mudança deste cenário é imprescindível, satisfazendo as necessidades e mantendo a qualidade de vida das gerações atuais, sem colocar em causa essa possibilidade às gerações seguintes- sustentabilidade (Silva 2012).

De modo a atenuar os graves impactos decorrentes do crescimento do consumo energético, surge o Protocolo de Quioto, tendo como principal objetivo assegurar que as emissões de gases que provocam o efeito de estufa, como o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), sejam reduzidas para níveis aceitáveis. Para tal, foram acordadas metas de redução que variaram de país para país, sendo que cada estado-membro ficou assim responsável por implementar medidas internas no sentido de alcançar objetivos como: criar hábitos de poupança, evitar gastos desnecessários, investir em fontes de energia renováveis e apostar na eficiência energética. A filosofia será então usar os recursos naturais a um ritmo igual ou inferior ao da sua renovação, evitando assim o seu esgotamento (Vale 2012).

A nível europeu, e para cumprir as metas acordadas no Protocolo de Quioto, têm vindo a ser implementadas medidas que protegem não só o ambiente, mas também a economia, destacando-se o Plano de Ação para a Eficiência Energética da Comissão Europeia. Este tem como objetivo reduzir, até 2020, o consumo de energia primária em 20%, a emissão dos gases com efeito de estufa em 20% e promover o incremento de energia proveniente de fontes de energia renovável em 20%. Apesar de este plano implicar, atualmente, alguns investimentos, estes serão amortizados num futuro não muito distante. Para além de se reduzir os vários impactos ambientais, alcança-se uma independência em relação a outros países, pelo facto de se reduzir os encargos com importações de combustível (Vale 2012), (Rodrigues 2014).

Em todo mundo, o consumo energético em supermercados representa uma importante parcela no consumo de energia, nomeadamente elétrica. Dentro deste consumo, o sistema de refrigeração representa a maior fatia de gastos de energia (40% a 50%) nestes edifícios comerciais, sendo por isso, ao longo destes últimos anos alvo de sucessivas avaliações e discussões relativamente aos seus consumos e impactos ambientais. A Figura 1, representa a

desagregação dos vários consumos existentes num supermercado (Silva 2012),(Oliveira 2012).

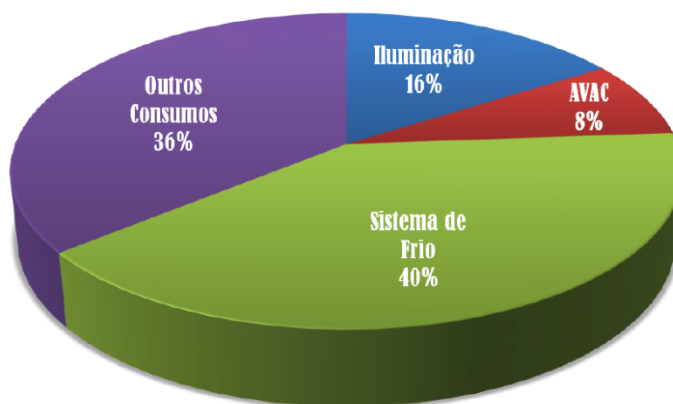


Figura 1 - Desagregação dos principais consumos de um supermercado tipo (Silva 2012)

Para além da forte concentração de equipamentos, como móveis, câmaras de frio, compressores e condensadores, os mesmos necessitam de estar no ativo quase 24 horas diárias, de modo a manter os produtos frescos ou congelados, o que explica os elevados consumos deste sistema.

Para tentar reduzir os gastos, são realizadas várias auditorias energéticas, de modo a conhecer as razões dos consumos e assim implementar medidas de melhoramento na loja. A auditoria energética, é um exame detalhado das condições de utilização de energia numa instalação, e nesse sentido, constitui um instrumento fundamental para qualquer gestor de energia. Depois do diagnóstico, verifica-se onde se está a gastar mais e, através de várias simulações computacionais, recomendam-se medidas de eficiência energética concretas e quantificadas, que permitem uma melhoria do sistema e consequente redução de custos (Silva 2012).

Um indicador para a perceção da performance de um edifício é o *benchmarking*. Este é uma ferramenta de gestão que avalia o desempenho de um edifício de forma comparativa e sistemática, procurando identificar e atuar nos fatores de sucesso e de insucesso. Atualmente, ter um bom plano de gestão de energia é uma vantagem considerável. Para tal, perceber como o edifício consome energia e o seu desempenho, é um dos primeiros passos para determinar medidas de melhoramento (Loureiro 2013).

## 1.2 Objetivos

Normalmente, as empresas de consultoria têm objetivos e preocupações diferentes relativamente às empresas de projeto, como por exemplo, identificar oportunidades de poupança de modo a tornar os edifícios mais eficientes. Uma vez que atualmente existe a necessidade de reduzir os consumos do sector dos edifícios para níveis equilibrados é necessário, em primeiro lugar, realizar auditorias aos mesmos para o conhecimento dos consumos e, de seguida, apresentar as melhores soluções para os reduzir. No entanto, nem sempre é fácil conhecer todos os dados necessários para uma melhor estimativa do consumo do edifício, tais como *layouts* ou dados de equipamentos. Assim, esta dissertação tem como finalidade a realização de um modelo para o cálculo estimado dos consumos energéticos da rede de frio de supermercados ou hipermercados.

Numa primeira fase, recorrendo a medições do consumo real de vários supermercados nacionais, tentar-se-á obter correlações matemáticas entre o consumo medido e a dimensão da rede ou da temperatura exterior, tendo em conta a localização.

Numa fase posterior, procede-se à realização do modelo em si. Primeiro, desenvolve-se uma metodologia de cálculo de carga térmica dos móveis e câmaras de frio, tendo em atenção aos ganhos internos e os ganhos provenientes do espaço. De seguida, desenvolve-se o modelo da central de frio, tendo em conta o tipo de compressores e condensadores a usar.

Por fim, aplica-se o modelo a dois casos reais e compara-se o consumo estimado obtido com o consumo realmente medido, obtendo, desta forma, o *benchmarking* do sistema de refrigeração. Também se pretende fazer uma comparação dos consumos obtidos com base nas correlações criadas na primeira fase, com os obtidos aplicando o modelo desenvolvido.

### 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se distribuída em 6 capítulos distintos e respetivos subcapítulos, de modo a que a informação fique organizada da melhor forma possível, permitindo uma mais fácil e rápida consulta através do índice. Este primeiro representa uma introdução aos restantes. Os capítulos seguintes diferenciam-se da seguinte forma:

- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, onde se faz uma breve referência ao que é a refrigeração, ao seu ciclo termodinâmico, e se dá uma maior ênfase ao circuito de refrigeração em supermercados: constituição, equipamentos usados, cargas térmicas e controlo. Finaliza-se o capítulo com uma referência generalizada do *benchmarking*;
- Capítulo 3: Apresentação das correlações criadas para o consumo de um supermercado com base em dados reais;
- Capítulo 4: Apresentação do problema: explicação detalhada do modelo desenvolvido: Apresentação do modelo, como foi realizado e pressupostos assumidos;
- Capítulo 5: Aplicação do modelo a dois casos reais: apresentação e análise dos resultados;
- Capítulo 6: Conclusões e trabalhos futuros.

### 1.4 Apresentação da empresa

Esta dissertação foi desenvolvida e orientada em ambiente empresarial, no ramo da gestão da energia, numa empresa denominada: Edifícios Saudáveis Consultores. Esta nasceu em 1996, iniciando a atividade na colaboração em projetos europeus de investigação e desenvolvimento relacionados com soluções de eficiência energética e qualidade do ambiente interior. Atualmente, a ESC conta com trabalhos desenvolvidos em vários países da Europa e América do Sul, oferecendo serviços de consultoria especializada nas áreas da sustentabilidade ambiental em edifícios, com especial atenção à utilização de energia, contribuindo para a minimização dos impactos ambientais associados à atividade humana (Edifícios Saudáveis Consultores 2015).



## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Ciclo Frigorífico

Refrigeração é o processo termodinâmico onde se remove calor de um dado ambiente e se transfere para outro, normalmente o ambiente exterior, através de um fluido frigorigénio. Tanto é usada para processar e conservar produtos, como para efetuar a climatização de espaços de forma a alcançar o conforto térmico (Trane). Assim sendo, a refrigeração tem como objetivo retirar calor de uma fonte fria, de modo a que a temperatura seja mais baixa à do meio ambiente, e rejeitá-lo para uma fonte quente, estando esta a uma temperatura superior.

Para tal é necessário uma máquina frigorífica. Esta, ao ser aplicada uma dada quantidade de trabalho, absorve uma quantidade de calor a baixa temperatura e cede uma maior quantidade de calor à temperatura mais elevada. O processo de transferência de calor pode ser melhor compreendido na Figura 2.

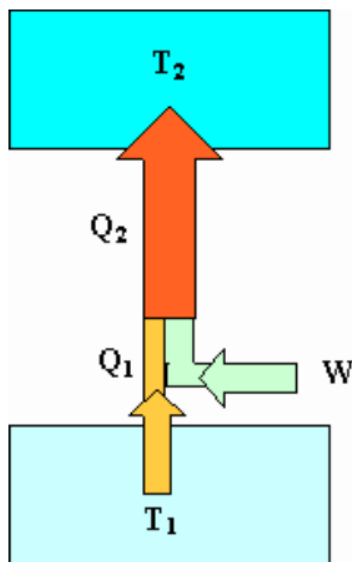


Figura 2 - Diagrama do funcionamento de uma máquina frigorífica (Mesquita 2009).

O processo de refrigeração é conseguido através de um ciclo termodinâmico, onde o calor é extraído do ambiente a arrefecer e é enviado para ambiente externo. O ciclo mais comum é o ciclo frigorífico de compressão de vapor.

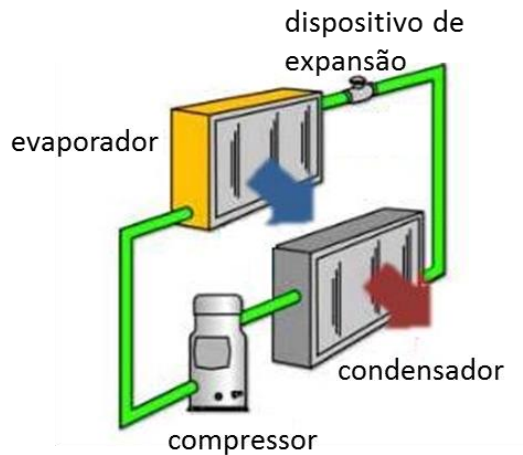
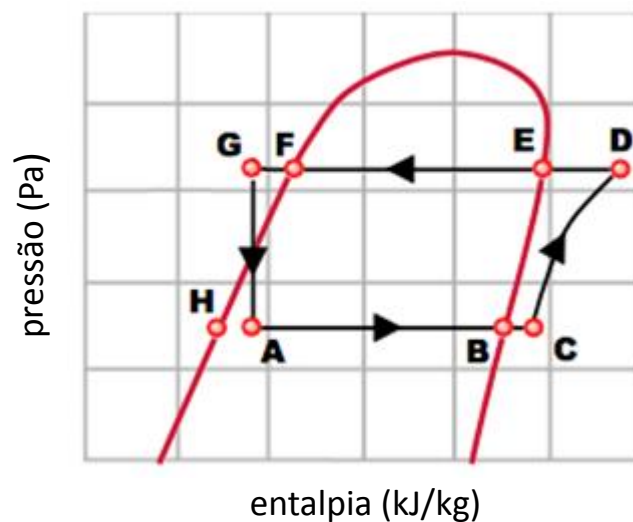


Figura 3 - Ciclo de compressão a vapor (Trane).

Como evidencia a Figura 3, o ciclo é composto por compressor, condensador, evaporador e válvula de expansão. O compressor é utilizado para comprimir o vapor de fluido frigorigénio, de modo a aumentar a pressão antes de entrar no condensador. Neste último, o fluido a alta temperatura troca calor, normalmente com o ar exterior, condensando, mantendo-se ainda a uma temperatura elevada. Em seguida, no estado líquido, o fluido entra na válvula de expansão de modo a existir uma elevada queda de pressão e consequente redução da temperatura. Esta redução de temperatura é suficientemente elevada para permitir que, no evaporador, o fluido absorva calor e arrefeça o espaço pretendido. Neste, o fluido aquece, evapora e volta ao compressor, onde o ciclo é repetido (Trane).

Analisando o ciclo num Diagrama de *Mollier*, Figura 4, pode-se visualizar as diferentes fases dos processos que ocorrem nos vários componentes do sistema. O diagrama representa a entalpia no eixo das abcissas e a pressão no eixo das ordenadas.

Figura 4 - Diagrama de *Mollier* (Trane).



Fora da curva, o lado direito do gráfico indica as condições do fluido na fase de vapor sobreaquecido. Em contrapartida, o lado esquerdo indica as condições do fluido na fase de líquido comprimido. No interior da curva, onde se situa o ponto A, dá-se a fase da mistura líquido e vapor, vapor húmido, sendo os pontos F e H as fronteiras do lado esquerdo da curva onde se verifica o estado de líquido saturado e os pontos B e E as fronteiras do lado direito onde se verifica a condição de vapor saturado. No caso de a entalpia do fluido se encontrar à direita da curva, ponto C, o vapor é sobreaquecido. Da mesma forma, se a entalpia do refrigerante se encontra à esquerda, ponto G, o líquido é comprimido (Trane).

O aumento da entalpia de C para D é explicado pelo facto de ser fornecido calor ao fluido na fase de compressão. Este calor é denominado calor de compressão (Trane).

O fenómeno de sobreaquecimento, B-C, é importante uma vez que evita danos no compressor. Este é projetado para comprimir vapor, sendo que uma compressão líquida causa problemas de lubrificação e danifica as válvulas do compressor. Assim a sua função é evitar entrada de líquido no compressor.

O subarrefecimento, para além de aumentar o efeito frigorífico, garante que o fluido frigorígeno está totalmente no estado líquido à entrada da válvula de expansão, que caso contrário poderia por em causa o funcionamento desta.

O sobreaquecimento e subarrefecimento podem ser conseguidos independentemente um do outro ou então simultaneamente com a ajuda de um permutador de calor como mostra a Figura 5.

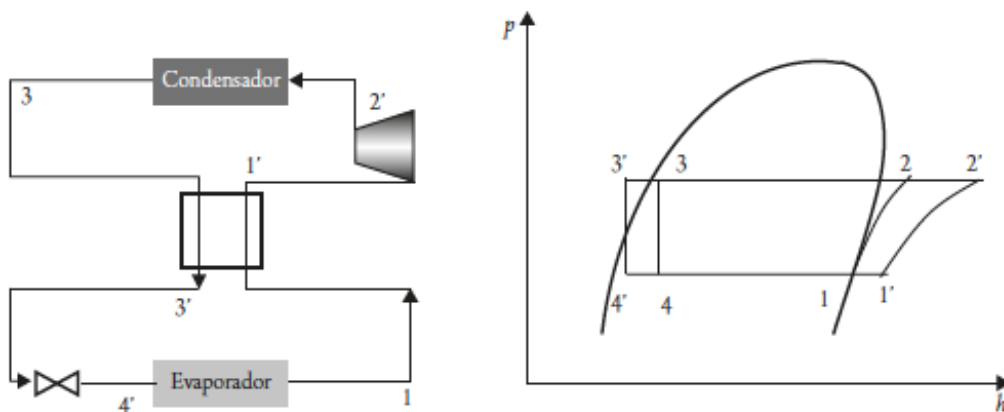


Figura 5 - Ciclo frigorífico com permutador calor interno (Afonso 2008).

Como se verifica na Figura 5, com um permutador de calor interno, é possível obter um sobreaquecimento de 1 para 1' e um subarrefecimento de 3 para 3' (Afonso 2008).

Devido a perdas de carga no condensador, evaporador, compressor e no dispositivo de expansão ou sobreaquecimento e subarrefecimento não propósitos, o ciclo real é desigual ao teórico. A Figura 6 ilustra esta diferença (Afonso 2008).

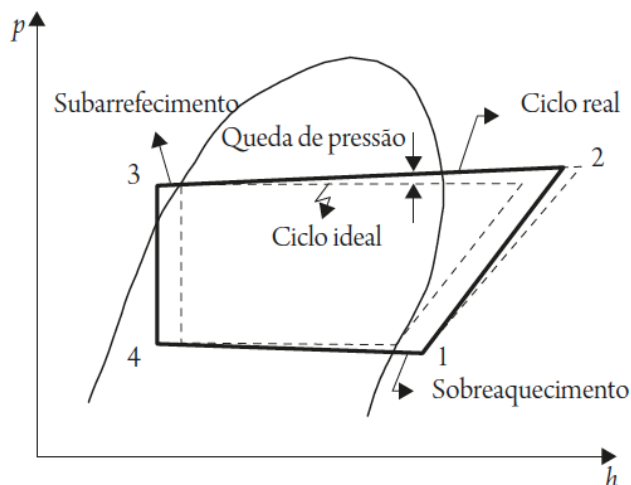


Figura 6 - Ciclo frigorífico de compressão de vapor real (Afonso 2008).

## 2.2 Supermercados

### 2.2.1 Sistema de frio

A refrigeração comercial pode ser dividida em duas categorias: sistemas centralizados e sistemas de refrigeração independentes ou autónomos. A primeira, utilizada em grandes superfícies, como supermercados e hipermercados, contém um condensador, normalmente no telhado, que permite a troca de calor com o ar exterior, um *rack* de compressores, móveis (expositores) e câmaras. Na segunda, todos os componentes, incluindo o condensador, são incorporados na estrutura do frigorífico. Esta categoria é utilizada em lojas de conveniência, restaurantes, talhos, etc (Goetzler, Goffri et al. 2009).

Como este trabalho trata a refrigeração em supermercados, apenas será referenciado o sistema centralizado.

Os supermercados e hipermercados são superfícies onde se verificam grandes consumos energéticos, essencialmente elétricos, representando uma importante parcela de consumo de energia no mundo todo, uma vez que o ser humano necessita de manter produtos abaixo da temperatura ambiente, de modo a garantir a sua durabilidade e qualidade. Os principais grupos consumidores de energia são a iluminação, climatização e o sistema de refrigeração. Estes consumos variam consoante a localização da loja, derivado das condições climáticas, da ocupação e do seu funcionamento, eficiência de equipamentos utilizados, entre outros. É de realçar que o sistema de frio é o maior consumidor de energia, atingindo percentagens a rondar os 40% e os 50 % (Oliveira 2012),(Goetzler, Goffri et al. 2009),(ASHRAE 2014).

O sistema de frio de um supermercado divide-se em duas centrais - a central de positivos e a central de negativos – cada uma com o seu circuito de refrigeração. A primeira é utilizada para refrigerar os produtos, isto é, mantê-los frescos e prontos para o consumo, evitando que os mesmos se estraguem, sendo que a temperatura de evaporação ronda os -10 °C. A segunda é utilizada para manter os produtos congelados, de modo a armazená-los por longos períodos de tempo, estando a temperatura de evaporação à volta dos -30 °C (Oliveira 2012),(ASHRAE 2014).

Cada central é composta por um ou mais compressores e um condensador, por forma a poder refrigerar os respetivos móveis frigoríficos e câmaras frigoríficas. No circuito de negativos, existe ainda uma máquina de gelo. Os móveis encontram-se na sala de vendas, onde são colocados os produtos refrigerados ou congelados para venda. Antes de serem colocados nos móveis, os produtos são armazenados em câmaras frigoríficas, localizadas no armazém. A este local dá-se o nome de zona de câmaras e a sua função é armazenar os produtos a uma temperatura que permita a sua conservação. Os compressores são colocados na sala de máquinas, onde também se alojam o quadro elétrico do sistema de frio, controlos de segurança e os depósitos de fluido frigorígeno. Os condensadores normalmente encontram-se no telhado, de modo a poderem trocar calor com o ar exterior. Um resumo explicativo da constituição da rede de frio do supermercado poderá ser encontrado na Figura 7, bem como o circuito de refrigeração na Figura 8 (Oliveira 2012), (Goetzler, Goffri et al. 2009).

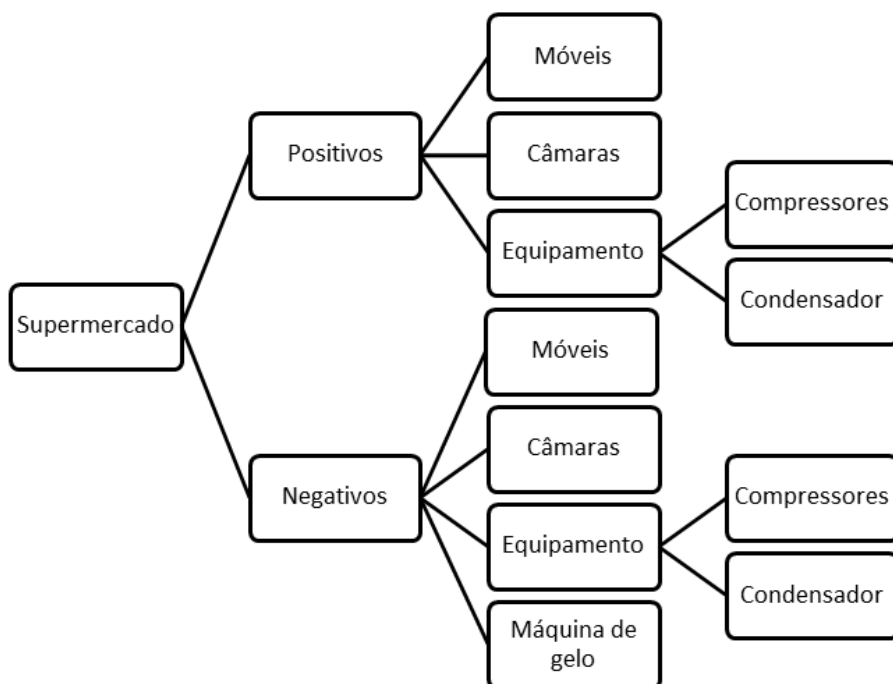


Figura 7 - Estrutura da rede de frio de um supermercado típico.

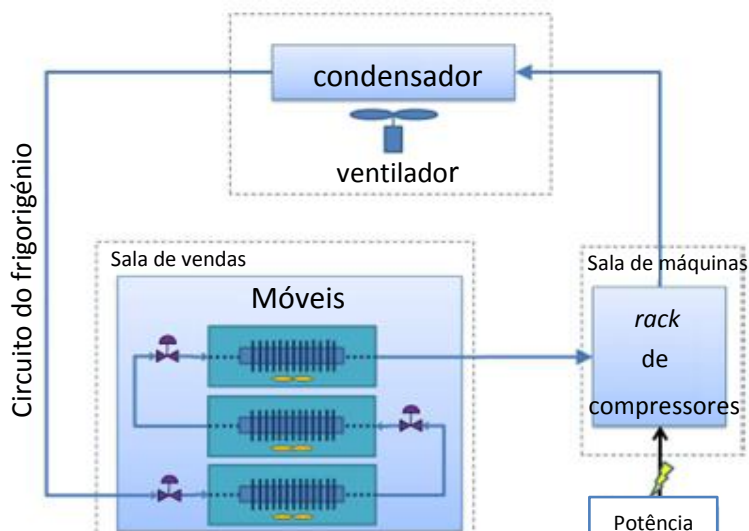


Figura 8 - Circuito de refrigeração de um supermercado típico (Goetzler, Goffri et al. 2009).

### 2.2.2 Equipamentos

Neste subcapítulo serão abordados os principais componentes de um sistema de refrigeração utilizados no modelo desenvolvido bem como o seu funcionamento, tais como condensadores, evaporadores, dispositivos de expansão, compressores, móveis e câmaras.

#### Compressores

Os sistemas de refrigeração podem ser geralmente classificados em simples ou *racks* de compressores, dependendo de como o projetista define o projeto. Este tem como objetivo satisfazer as necessidades pretendidas com o menor custo associado. No sistema simples, apenas um compressor é usado para alimentar o sistema total. Os *racks* de compressores, solução mais utilizada no ramo da refrigeração industrial, consistem em dois ou mais compressores ligados em paralelo ao mesmo circuito frigorífico, os quais podem funcionar simultaneamente ou parcialmente, conforme a demanda de refrigeração necessária. Assim, apresentam uma melhor solução quando comparados com o sistema simples, sobretudo pela sua eficiência e economia energética, uma vez que apenas entre 5 a 10% do tempo ocorre a carga térmica máxima, e no restante ocorre o funcionamento ocioso do equipamento (ASHRAE 2014), (W Indústria Ltda 2012). Portanto, à medida que a carga térmica sofre variação, os compressores acompanham as mesmas, alterando as condições do seu funcionamento.

O compressor tem como função comprimir e assim sendo, elevar a pressão de fluido frigorígeno, para depois este prosseguir para o condensador e assim rejeitar calor para outro fluido, normalmente o ar exterior. Os tipos de compressores utilizados nesta dissertação foram: alternativo e rotativo de parafusos. Os compressores podem ainda subdividir-se em: hermeticamente fechados, semi-herméticos ou abertos.

Um compressor aberto é acionado por uma fonte de energia externa, por exemplo um motor elétrico, que se encontra separado do compressor, sendo a transmissão efetuada normalmente através de correias. Deste modo, neste tipo de compressores o acesso ao interior é facilitado. O calor do motor é rejeitado para o espaço onde ele se encontra, sendo arrefecido por ar. Nos compressores herméticos, o motor e o compressor encontram-se acoplados e ambos encerrados por invólucro metálico selado, sendo o motor arrefecido pelo fluido frigorígeno e o calor rejeitado pelo condensador. Nos semi-herméticos, apesar do motor e o compressor se encontrarem acoplados e envolvidos por um invólucro metálico, este pode ser desparafusado com vista a uma manutenção local (Trane).

#### ➤ Compressores Alternativos

Nos compressores alternativos ou de pistão, o vapor é comprimido por um pistão sendo depois bombeado por uma válvula de descarga. O frigorígeno é aspirado para dentro dos cilindros, devido ao curso descendente do pistão, e a compressão é feita no movimento ascendente deste. O pistão está ligado a uma cambota, que ao rodar, faz com que o pistão se movimente e extraia o vapor para dentro do cilindro, onde é comprimido e descarregado (Mesquita 2009). O ciclo de compressão é caracterizado em três fases: sucção, compressão e descarga. Na fase de sucção, o fluido a baixa pressão é sugado pela válvula de admissão e o movimento do pistão aumenta o volume interno do cilindro. Durante esta fase o pistão cria um efeito de vácuo, reduzindo a pressão no interior do cilindro para baixo da pressão de aspiração, o que faz abrir a válvula de aspiração e o vapor é aspirado para dentro do cilindro. Na fase de compressão, o pistão sobe, movimento que causa a diminuição do volume interno do cilindro (aumento da pressão no interior do cilindro), aumentando assim a pressão do fluido, provocando o fecho da válvula de admissão. A fase de descarga ocorre quando a

pressão interna do cilindro é maior que a das molas da válvula de descarga, originando a abertura da mesma que permitirá o escoamento do fluido (Trane).

#### ➤ Compressores de parafuso

São os mais utilizados devido à sua maior confiabilidade e eficiência. São máquinas de deslocamento positivo que possuem dois rotores, macho e fêmea, acoplados e montados em chumaceiras. O rotor macho, que aciona o rotor fêmea, tem um perfil convexo, enquanto que a fêmea tem um perfil côncavo.

O vapor entra pela porta de admissão no topo, à medida que o rotor macho impõe o movimento, ficando preso num espaço entre os rotores. Entre estes, óleo é injetado para diminuir o desgaste. À medida que os rotores rodam, o espaço na engrenagem entre o macho e a fêmea diminui de volume, comprimindo desta forma o fluido, até que este seja descarregado na porta de saída (Trane).

### Condensadores

O condensador é um permutador de calor, utilizado para rejeitar o calor do fluido frigorigénio para outro meio, normalmente ar exterior ou água. O fluido chega ao condensador com elevada pressão e temperatura, com o objetivo de rejeitar o calor absorvido pelo evaporador e o calor adicionado pelo compressor. Para tal, o processo de condensação dá-se ao longo de três fases (Martinelli 2011).

- Arrefecimento sensível do fluido
- Fase de condensação do fluido
- Subarrefecimento do líquido

O arrefecimento sensível do fluido consiste em baixar a temperatura do fluido, ainda no estado gasoso, até à temperatura de condensação. Atingida a temperatura de condensação dá-se a fase de condensação, onde começa a mudança de estado de fluido, fase essa a temperatura constante. Após a condensação, atingindo o estado de líquido saturado, o fluido é novamente arrefecido, de modo a garantir que o fluido se encontre totalmente na fase líquida à entrada do dispositivo de expansão (Martinelli 2011).

Os tipos mais comuns de condensadores são: refrigerados a ar, água ou por evaporação. Neste trabalho apenas são focados os condensadores arrefecidos a ar, uma vez que apenas estes foram utilizados no modelo desenvolvido.

#### ➤ Condensadores arrefecidos a ar

Este tipo de condensadores usa ventiladores para extrair a passagem de ar exterior pelas serpentinas, e deste modo arrefecer o fluido frigorigénio que circula interiormente destas. O ar está a uma temperatura mais baixa que o fluido frigorigénio, induzindo uma transferência de calor deste para o ar. Assim, a quantidade de calor no fluido frigorigénio diminui, fazendo com que este condense. No final da serpentina, adiciona-se uma serpentina secundária, utilizada para baixar a temperatura a que o fluido foi condensado (subarrefecimento) (Trane). A Figura 9 mostra um exemplo deste tipo de condensadores.

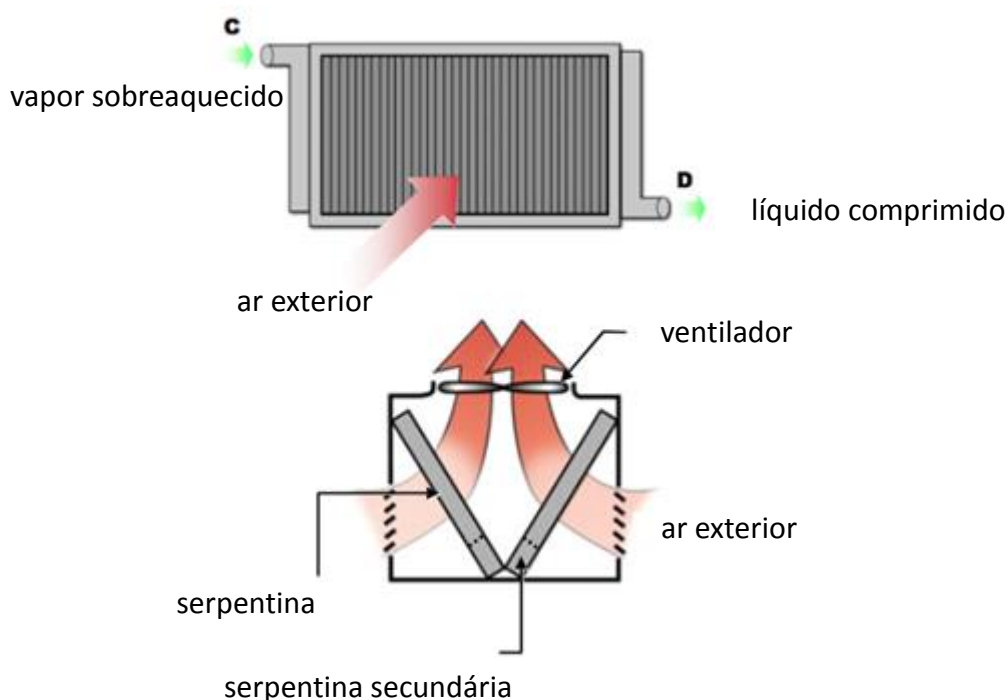


Figura 9 - Condensador arrefecido a ar (Trane).

Os condensadores arrefecidos a ar são bastantes utilizados em aplicações comerciais já que não necessita de proteção contra o fenómeno de congelamento e tratamento de ar, que não se verifica num condensador arrefecido a água (Trane).

## Evaporador

O evaporador é um permutador de calor que transfere o calor de um qualquer fluido para o fluido frigorigénio que se encontra a baixa temperatura (Trane). Está situado no interior de cada móvel, com o objetivo de manter a temperatura deste às condições pretendidas para refrigerar ou congelar os produtos.

O fluido entra no evaporador a uma pressão baixa, evaporando assim a uma baixa temperatura. Seguidamente sofre um aumento de temperatura- sobreaquecimento.

Estes dispositivos podem ser classificados quanto ao sistema de alimentação, como secos ou inundados, ou quanto ao fluido a arrefecer como, para ar, água ou de contacto (Martinelli 2011), (Castro 2010). Neste trabalho apenas serão abordados os evaporadores para arrefecer ar, visto serem os usados na rede de frio de um supermercado.

### ➤ Classificação dos Evaporadores Quanto ao Sistema de Alimentação.

#### ✓ Evaporadores Secos

Nestes, a quantidade de fluido é controlada por uma válvula de expansão de forma a admitir a quantidade suficiente e assim fazê-lo evaporar completamente à saída da serpentina. Deste modo, o fluido frigorigénio, no estado líquido, entra de forma intermitente, existindo numa parte do dispositivo vapor húmido e na outra, vapor sobreaquecido, sendo este conseguido através do calor ganho ao escoar no interior da serpentina (Martinelli 2011), (Castro 2010).

### ✓ Evaporadores inundados

O fluido frigorigénio entra no evaporador no estado líquido e, ao trocar calor com o meio a arrefecer, parte dele evapora passando para o estado de vapor húmido. Ao sair do evaporador, o fluido é guiado para um separador de líquido, que separa o líquido do vapor. Apenas vapor segue para o compressor, sendo o líquido reutilizado noutra ciclo igual. Na Figura 10, um exemplo destes evaporadores é ilustrado (Martinelli 2011), (Castro 2010).

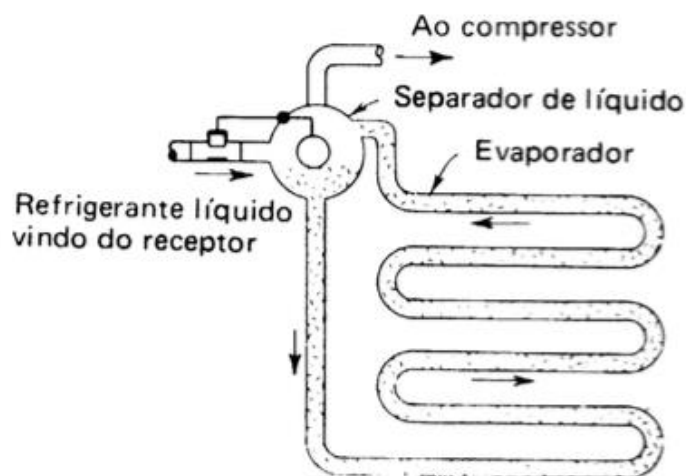


Figura 10 - Evaporador inundado (Martinelli 2011).

Os evaporadores inundados podem ter sua alimentação classificada em alimentação por gravidade ou por recirculação de líquido. No primeiro, o separador de líquido, alimenta o evaporador por gravidade. No segundo, o evaporador é alimentado por meio de uma bomba (Castro 2010).

### ➤ Classificação dos Evaporadores Quanto ao Fluido a arrefecer

#### ✓ Evaporador para arrefecer ar

Ao vaporizar no interior das serpentinas, o fluido frigorigénio arrefece diretamente o ar que escoa ao redor destas, sendo este utilizado para arrefecer os produtos colocados dentro dos móveis ou câmaras frigoríficas. Estes tipos de evaporadores podem ser classificados como evaporadores de convecção natural ou forçada.

Os evaporadores de convecção natural podem ser de tubos lisos ou alhetados, sendo utilizados quando se pretende velocidades baixas do ar e elevada humidade relativa no ambiente refrigerado. Os evaporadores mais utilizados nos móveis e nas câmaras frigoríficas são os evaporadores de convecção forçada, constituídos por uma serpentina lisa ou alhetada e ventiladores que asseguram a circulação do ar (Trane).

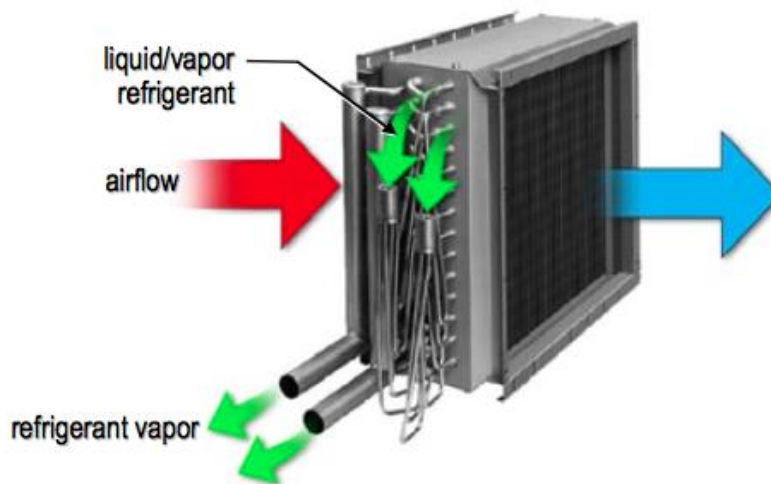


Figura 11 - Evaporador para arrefecer ar (Trane).

A Figura 11 representa um evaporador com filas de tubo que passam através de placas formadas por alhetas. O fluido frigorigénio escoa no interior dos tubos nos quais o ar quente entra em contacto, transferindo calor fazendo com que o fluido evapore. As alhetas são utilizadas para aumentar a transferência de calor do ar para o fluido frigorigénio. À medida que o fluido vai escoando, este vai absorvendo calor e atinge o estado de vapor saturado. No final da tubagem, onde a diferença de temperatura entre o fluido e o ar é mais alta, diferença esta que acelera a taxa de transferência de calor, o fluido ganha mais calor, ou seja aumenta a sua temperatura o que causa o sobreaquecimento desejado para assegurar que o compressor não aspire líquido (Trane).

### Dispositivo de expansão

O dispositivo de expansão tem como finalidade a diminuição da pressão do fluido frigorigénio para a pressão de evaporação e consequente diminuição da sua temperatura. Estão localizados antes de cada evaporador, ou seja, o número de válvulas no circuito depende do número de móveis que cada supermercado contém (cada móvel contém no mínimo um evaporador). Exemplos de dispositivos de expansão são: as válvulas de expansão de pressão constante, termostáticas, eletrónicas, válvulas de boia, e tubos capilares.

Neste trabalho será apenas focada a válvula de expansão termostática devido à sua grande utilização e relevância.

#### ➤ Válvula de expansão termostática

São válvulas cuja função, para além de diminuir a pressão, é regular o fluxo que chega ao evaporador de forma a manter um certo grau de sobreaquecimento do vapor. Se por um lado entrar demasiado fluxo no evaporador, este não é totalmente vaporizado e entra líquido para o compressor causando danos, por outro, caso não entre fluxo suficiente, o fluido vaporiza demasiado rápido e o efeito frigorífico é demasiado baixo. A função das válvulas de expansão termostáticas é, nem mais nem menos, assegurar a quantidade ideal de fluxo no evaporador (Trane), (Danfoss 2005).

São constituídas pelo corpo, por uma mola, um diafragma, e um bolbo. Este último é um sensor de temperatura e pressão, usado como referência, colocado no final da serpentina do evaporador de modo a controlar a quantidade de frigorigénio para manter o sobreaquecimento (Trane), (Danfoss 2005).

O bolbo contém no seu interior o mesmo fluido frigorigénio utilizado no sistema no estado saturado, conectado à parte de cima do diafragma da válvula. À parte de baixo deste é ligada uma linha de equalização, localizada a jusante do bolbo, que transmite a pressão do vapor de



frigorigénio à válvula. Como explicado anteriormente, o fluido ao escoar no evaporador, vai aumentar a sua temperatura e atingir o estado de vapor saturado. Ao atingir este estado, qualquer aumento de temperatura leva ao estado de vapor sobreaquecido, aumento este que ocorre na fase final da tubulação, local onde está instalado o bolbo. Como dentro do bolbo existe fluido saturado, este aumento de temperatura provoca um aumento de pressão no interior do mesmo e, consequentemente na parte superior do diafragma. Esta movimentação do pino para baixo, originando a abertura da válvula e aumento do fluxo de frigorigénio, de modo a entrar no evaporador mais líquido de forma a satisfazer a carga térmica. Assim sendo, se a carga térmica do sistema aumentar, o fluido na serpentina vaporiza de forma mais rápida, elevando a pressão no bolbo, que assim provoca a descida do pino para que passe mais fluxo (abertura da válvula). De forma contrária, se a carga térmica do sistema diminuir, a pressão no bolbo diminui e o pino move-se para cima (fecho da válvula). Quando se obtém o sobreaquecimento desejável a válvula volta a posição de equilíbrio. Ao aumento ou diminuição do sobreaquecimento necessário para abrir ou fechar a válvula designa-se gradiente (EMERSON Technologies 2006). Na Figura 12, são demonstradas as várias pressões na válvula.

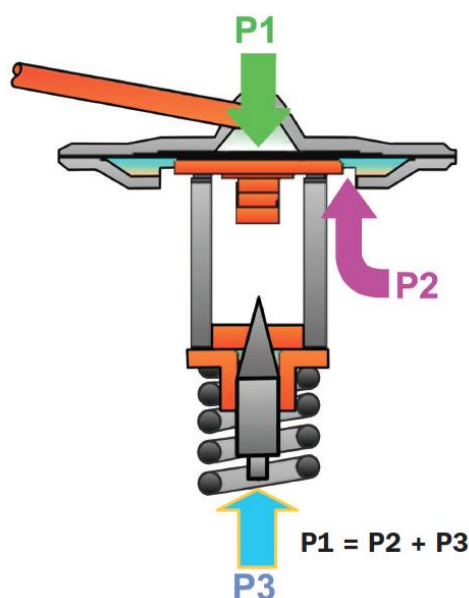


Figura 12 - Pressões na válvula termostática (EMERSON Technologies 2006).

P1 representa a pressão no bolbo, P2 a pressão no final da serpentina do evaporador e P3 a pressão na mola, sendo ajustada inicialmente para equilibrar as forças no diafragma e produzir o sobreaquecimento pretendido. Este ajuste vai determinar um certo sobreaquecimento em condições de equilíbrio que se vai alterando à medida que as outras pressões alteram. A Figura 12 representa o estado de equilíbrio da mola (EMERSON Technologies 2006).

Como se verifica na Figura 13, a pressão de entrada de fluxo, isto é, a força causada pelo fluxo que sai do condensador e entra na válvula, não é representada. Isto porque, estas válvulas são equilibradas com portas que direcionam a pressão de entrada para o pino e para o rebaixo, exercendo forças nos mesmos. Estas, de igual intensidade e sentidos opostos, irão anular-se para qualquer condição de funcionamento do sistema (EMERSON Technologies 2006). Na Figura 13, tal explicação pode ser melhor compreendida

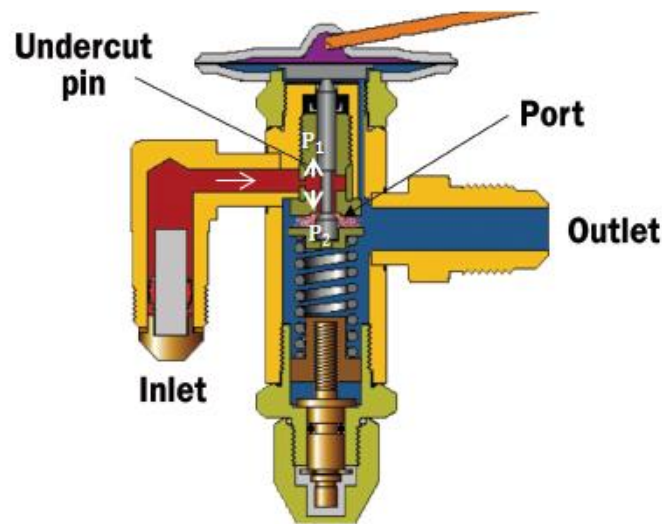


Figura 13 - Explicação da pressão de entrada (EMERSON Technologies 2006).

## Móveis

Os móveis frigoríficos podem ser horizontais, com ou sem porta, verticais, com ou sem porta, ou a junção dos dois, designada por *combis*, geralmente com porta. Nesta secção serão descritos os móveis negativos e positivos mais comuns.

### ➤ Móveis positivos

No circuito de positivos, é comum encontrar-se murais com (Figura 15) ou sem porta (Figura 16), semi-murais (Figura 14) e vitrinas (Figura 17). Os dois primeiros pertencem à classe de móveis verticais, sendo utilizados para armazenar produtos como iogurtes, manteigas e vegetais, e o terceiro à classe de móveis horizontais, utilizados na charcutaria e padaria. Neste circuito, as temperaturas dos móveis rondam entre os 0 °C e os 6 °C (Goetzler, Goffri et al. 2009), (Portilla 2010).



Figura 14 - Semi-mural (Névé 2011).



Figura 15 - Mural com portas (Névé 2011).



Figura 16 - Mural sem portas (Névé 2011) .



Figura 17 - Vitrina (Névé 2011).

Os murais verticais são usados para expor grande volume de alimentos por metro quadrado, devido ao uso de prateleiras. Os murais sem portas requerem elevada capacidade frigorífica devido à carga removida ao espaço, sendo esta a principalmente causada pela diferença de temperatura da loja e do interior do móvel. Os murais com porta apresentam uma redução de cerca de 35% a 40% na capacidade frigorífica quando comparados com os anteriores (mesmo necessitando de resistências de desembaciamento para evitar, como o próprio nome indica, o embaciamento dos vidros das portas de forma a permitir a boa visibilidade do produto exposto nas prateleiras) (Oliveira 2012), (ASHRAE 2014), (Portilla 2010). A inclusão de portas, para além da redução no consumo, permite também um maior conforto para clientes e colaboradores, já que evita o desagradável “corredor frio” (Oliveira 2012).

As vitrinas usadas, por exemplo na charcutaria, permitem que o funcionário da loja tenha acesso aos produtos pela parte de trás, ao mesmo tempo que o cliente os observa pela parte da frente (Portilla 2010).

#### ➤ Móveis negativos

No circuito de negativos é comum encontrar-se *combis* (Figura 20) e ilhas com ou sem porta, sendo as mais usuais com porta (Figura 18). As últimas pertencem à classe dos móveis horizontais. Por vezes, principalmente nos supermercados mais recentes, podem-se encontrar murais verticais com porta (Figura 19). Neste circuito, as temperaturas dos móveis rondam entre os -18 °C e os -24 °C (Oliveira 2012).



Figura 18 - Ilha com porta (Névé 2011).



Figura 19 - Mural com porta (Névé 2011).



Figura 20 - *Combi* (Névé 2011).

As ilhas são utilizadas para armazenar produtos congelados. A grande desvantagem destes expositores, quando comparados com expositores verticais, reside no facto de não poderem armazenar um grande número de produtos (Portilla 2010).

Os murais verticais para negativos são semelhantes aos positivos, explicados acima, com a exceção de conterem o descongelamento para o evaporador, fenómeno explicado mais à frente no decorrer do trabalho (Portilla 2010).

### **Câmaras**

As câmaras são o local onde se armazenam temporariamente os produtos antes de irem para os móveis. Nesta secção serão descritas as câmaras de positivos e negativos.

#### ➤ Câmaras frigoríficas

As câmaras frigoríficas são utilizadas no circuito de positivos para refrigerar alimentos com temperaturas positivas. Dentro deste tipo de câmaras existem 3 intervalos diferentes de temperatura de conservação, dependendo do tipo de produto fresco a refrigerar. Estes são de (Oliveira 2012):

- 0°C a 2°C para peixes ou carnes
- 2°C a 4°C para frutas, alimentos de charcutaria e outros
- 10°C a 12°C para os laboratórios, isto é, câmaras de trabalho utilizadas para preparar alguns produtos, como por exemplo embalar carne, antes de serem comercializados.

#### ➤ Câmaras de congelados

As câmaras de temperaturas negativas são destinadas à produção de frio para produtos congelados, com intervalo de temperatura entre -18°C e os -24°C (Oliveira 2012).

### **Máquina de gelo**

O supermercado inclui uma máquina de gelo, para a produção de gelo granulado destinado à conservação do peixe fresco vendido (Oliveira 2012), (Goetzler, Goffri et al. 2009).

### 2.2.3 Cargas Térmicas

Para saber quais as potências frigoríficas de cada móvel ou câmara frigoríficas, calculam-se as respetivas cargas térmicas. A carga térmica de refrigeração é a quantidade de calor a ser removida, com o objetivo de manter o produto do expositor na temperatura necessária à sua conservação. É dada pela soma de ganhos internos e ganhos provenientes do espaço (ASHRAE 2014), (Portilla 2010).

Os ganhos internos são ganhos não afetados pela classe climática da loja, o que faz com que sejam constantes ao longo de todo ano. Inserem-se nesta categoria: ganhos provenientes de componentes que funcionam dentro do móvel ou da câmara, como iluminação (lâmpadas), ventiladores, resistências de desembaciamento (móveis com portas) e sistema de descongelamento. Nas câmaras, terão ainda de ser considerados ganhos relativamente aos produtos armazenados, que entram a uma temperatura diferente à do interior da câmara, ganhos referentes aos trabalhadores e empilhadores que efetuam a reposição dos produtos, provenientes de um transporte refrigerado. Ao contrário dos internos, os ganhos externos são influenciados pelo clima da loja, nomeadamente, a temperatura e a humidade. Estes ganhos resultam da transmissão de calor através das paredes do móvel ou câmara (condução e radiação), infiltrações (renovações por hora e abertura de portas) (ASHRAE 2014).

As cargas térmicas podem ainda dividir-se em cargas sensíveis e latentes. Em geral, a porção sensível consiste no ganho de calor proveniente das luzes, dos ventiladores, do descongelamento, do desembaciamento, da condução, radiação e parte da infiltração. A porção latente consiste na restante parte de infiltração e da respiração do produto (ASHRAE 2014).

A percentagem de cada ganho varia com o tipo de móvel. Por exemplo, a componente de infiltração tem uma elevada percentagem nos expositores abertos, enquanto que a radiação tem um maior impacto nas ilhas (ASHRAE 2014).

Os componentes usados, tanto em móveis como em câmaras, variam de fabricante para fabricante. Na iluminação, é comum, em móveis antigos, encontrar-se iluminação tubular fluorescente do tipo T5 ou T8, e nos mais recentes, do tipo tubular LED. Esta tecnologia apresenta uma potência menor (redução média de 50 W para 15 W), e, consequentemente, um menor consumo, permitindo diminuir a temperatura de trabalho e, dessa forma, a carga térmica. Tal como ocorre no caso da iluminação, a ventilação também varia dos móveis mais antigos para os mais recentes: nos primeiros, encontram-se ventiladores *standard*, cuja potência ronda os 60 W, e nos últimos ventiladores de baixo consumo com potências médias de 15 W, dependendo do tipo de móvel em questão. Quanto ao desembaciamento, este é conseguido através de resistências elétricas, que variam consoante o tipo de móvel. No caso do descongelamento, que representa também uma contribuição considerável a nível dos ganhos internos, este pode ser efetuado de várias formas distintas, sendo explicado com maior pormenor de seguida (Oliveira 2012), (Goetzler, Goffri et al. 2009), (ASHRAE 2014).

Como referido em cima, os ganhos referentes ao espaço dependem bastante das condições do interior da loja. Sendo os supermercados normalmente climatizados, os fabricantes definiram condições padrão, classes climáticas, para definir a carga térmica por unidade de comprimento dos vários tipos de móveis. A classe climática de referência designa-se classe climática 3, sendo a sua temperatura de bolbo seco 25°C e a humidade relativa 60%. Caso as condições no interior da loja se alterem, a carga térmica discriminada nos catálogos é multiplicada por fatores corretivos de modo a adaptar-se às condições da loja (ASHRAE 2014). Na Tabela 1 são representadas os diferentes fatores corretivos para um móvel do tipo *combi*.



Tabela 1- Fatores corretivos para o móvel do tipo *combi*

Temperatura bolbo seco °C	Humidade Relativa (%)	Fator de correção
22	65	0,96
25	60	1
30	55	1,2
27	70	1,2

A humidade relativa do ar na loja é uma das variáveis mais críticas no que diz respeito à influência sobre o desempenho dos expositores, uma vez que o excesso desta no espaço e a sua interação com o ar do interior dos móveis ou câmaras pode conduzir à formação de gelo no evaporador.

A formação de gelo nas serpentinas do evaporador é um dos maiores problemas em refrigeração, sendo o excesso de humidade no interior das câmaras ou móveis a principal causa. O gelo formado bloqueia as serpentinas do evaporador e cria, assim, uma resistência térmica adicional que contribui para a redução da troca de calor e que tem como consequência um aumento do consumo energético (sobrecarga no motor do ventilador, pois este vai tentar fazer passar o mesmo ar que passava antes da formação de gelo) e uma redução da capacidade frigorífica (Lopes 2012).

Em muitos casos, o excesso de humidade provém do produto colocado nos móveis (ou câmaras) ou da abertura das portas, tornando este um problema de resolução complicada (Lopes 2012). Uma das soluções, para além de manter as portas fechadas tanto quanto possível, é realizar degelos periódicos, por forma a manter todo o espaço das serpentinas em condições para a passagem do ar (ASHRAE 2014), (Lopes 2012). O degelo pode ser realizado por resistências elétricas, gás quente, *off-cycle* ou por indução de ar ambiente (ASHRAE 2014).

As resistências elétricas são usadas quando a temperatura do ar do móvel não é suficientemente alta para descongelar a serpentina. Como tal, estas são usadas em móveis ou câmaras de circuitos negativos, estando dispostas em contacto com a serpentina do evaporador ou entre os ventiladores e o evaporador (ASHRAE 2014).

O degelo por gás quente, também usado em móveis ou câmaras de circuitos negativos, utiliza o próprio fluido frigorígeno para o descongelamento. Interrompe-se o circuito do fluido, que provém da válvula de expansão para o evaporador, e faz-se passar nas serpentinas deste vapor a alta temperatura, proveniente do compressor, que fará o próprio descongelamento. É de salientar que o fluido que promove o degelo é o próprio fluido que aqueceu no evaporador e foi comprimido no compressor, e que, assim, se encontra a uma elevada temperatura (ASHRAE 2014), (Danfoss).

*Off-cycle* é um processo de degelo no qual se interrompe o circuito de fluido frigorígeno para o evaporador (desliga-se a unidade), até que este atinja uma temperatura que permita o descongelamento. Este processo é usado apenas em móveis ou câmaras de circuito positivo e é bastante lento, uma vez que é conseguido com o calor proveniente do ar do espaço que circula no móvel ou na câmara (ASHRAE 2014).

Voltando agora aos ganhos externos, nomeadamente os ganhos referentes à transferência de calor dividem-se em condução e radiação. A condução é a carga relativa à transferência de calor através do invólucro do móvel, sendo a diferença de temperatura entre o espaço e o interior do móvel ou da câmara a principal razão para a transferência de calor. A radiação depende da temperatura, da emissividade e da área da superfície dos móveis e das câmaras, além de depender fortemente dos fatores de forma que relacionam a superfície com as paredes, chão e teto da loja, suas áreas e emissividades (ASHRAE 2014).

A infiltração é a transferência de calor devida à entrada de ar do interior da loja para o interior do móvel. Esta possui uma componente sensível e latente. A primeira é referente à diferença de temperatura entre a loja e o interior do móvel; a segunda é resultante da humidade (ASHRAE 2014). De modo a diminuir a infiltração, são usadas, em expositores abertos, cortinas de ar, que servem como uma resistência à entrada do ar da loja, que está a uma temperatura superior, para o interior do expositor. Um fluxo de ar é descarregado por bocais localizados no topo do móvel, que ao passar pela parte da frente deste, cria a cortina de ar, reduzindo a quantidade de ar “quente” que entra no móvel. Este processo pode ser melhor compreendido nas Figuras 21 e 22, onde é representada a cortina de ar num expositor vertical aberto. Outra alternativa passa por instalar cortinas noturnas, que durante os períodos de tempo em que as lojas estão fechadas ao público, criam uma barreira entre o móvel e o espaço, reduzindo as infiltrações e, conseqüentemente, o consumo de energia (Oliveira 2012), (ASHRAE 2014).

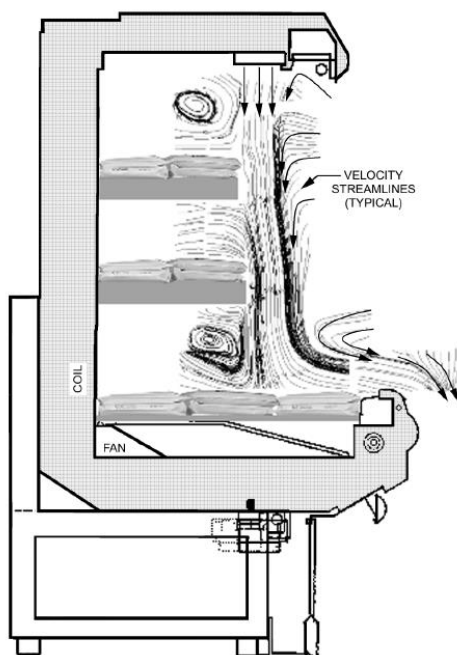


Figura 21 - Cortina de ar de um expositor vertical (ASHRAE 2014).

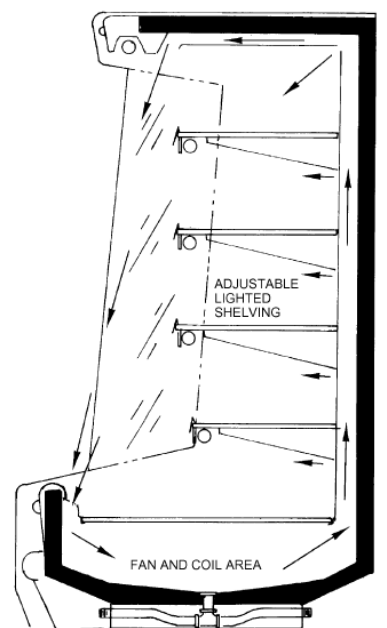


Figura 22 - Circulação do ar de um expositor vertical (ASHRAE 2014).

Um quadro resumo explicativo da composição das cargas térmicas nos móveis poderá ser encontrado na Figura 23, bem como das câmaras, na Figura 24.

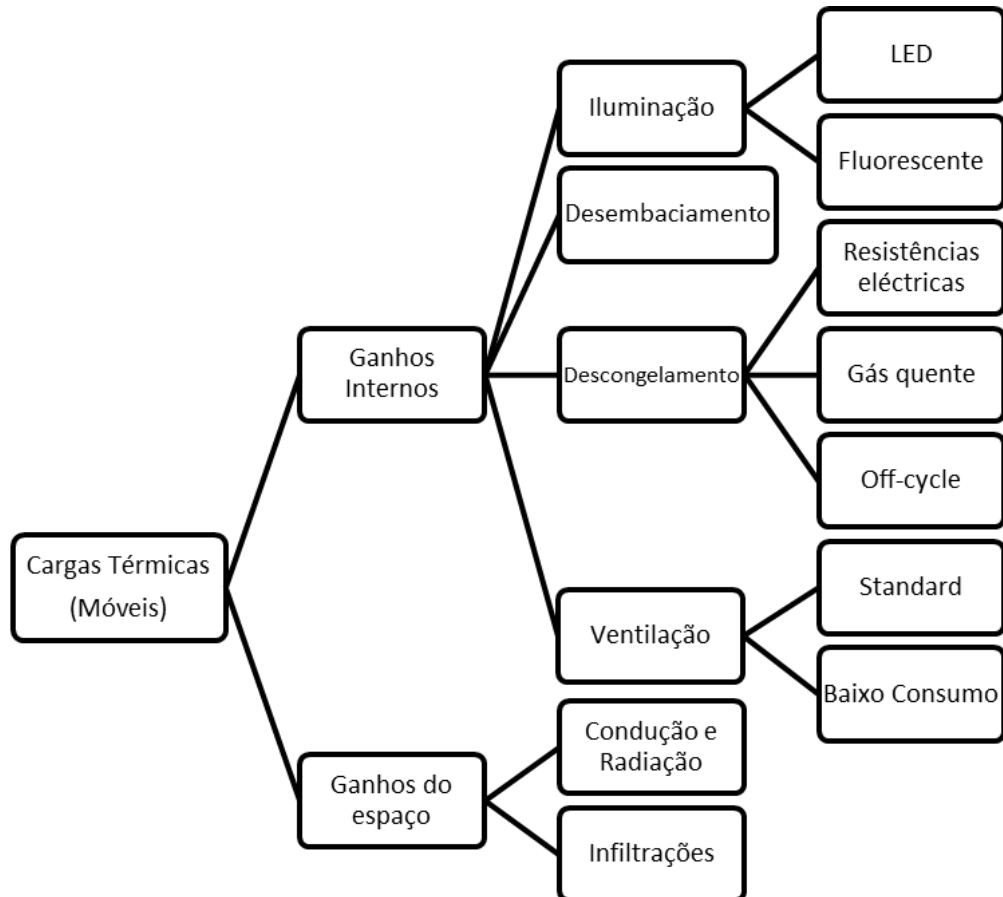


Figura 23 - Desagregação das cargas térmicas nos móveis.

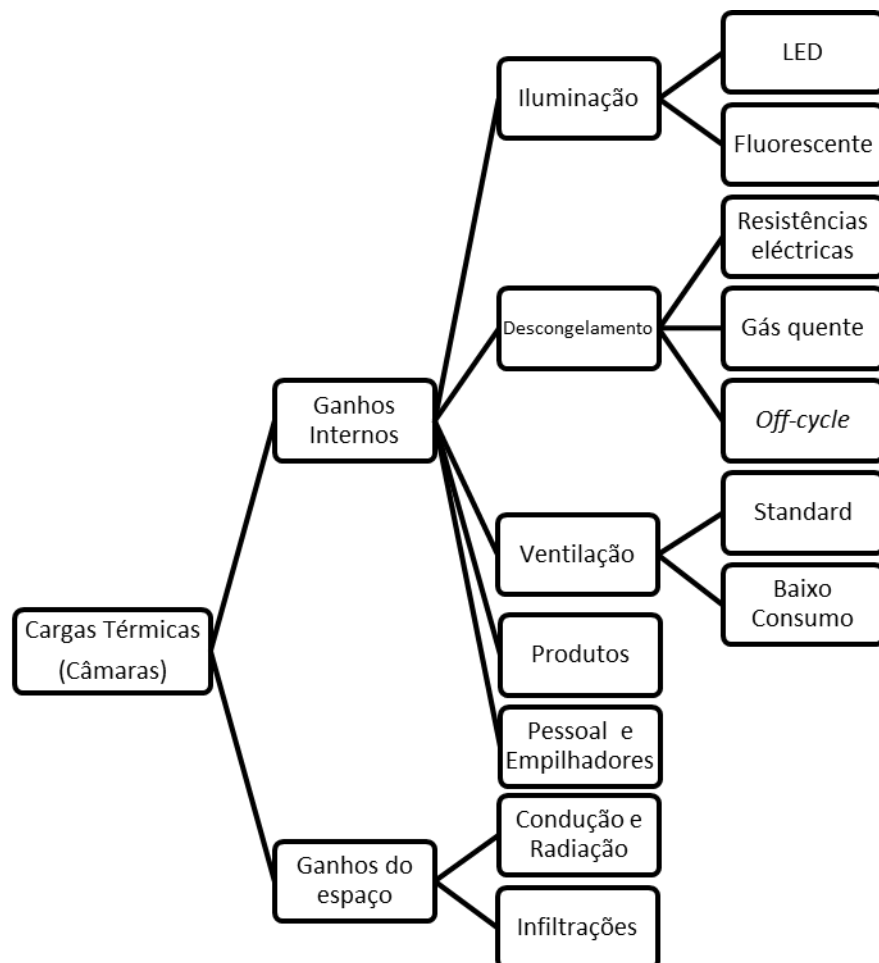


Figura 24 - Desagregação das cargas térmicas nas câmaras.



### 2.2.4 Controlo

Para maximizar a redução do consumo energético, devem ser implementadas soluções para minimizar os consumos energéticos associados a cada equipamento. Algumas, e conforme referido no subcapítulo 2.2.3, passam pela redução da carga térmica dos móveis ou das câmaras e consequentemente do seu consumo elétrico. São exemplos destas medidas: instalação de cortinas noturnas ou se possível móveis com portas, alteração da iluminação de fluorescente para LED, o uso de ventiladores de baixo consumo, entre outras.

Outras soluções passam por: usar válvulas eletrônicas em vez de mecânicas (por forma a poder baixar a temperatura de condensação nos dias frios), usar inversores nos compressores, evitar descongelamentos desnecessários, usar variadores de velocidade nos compressores e nos ventiladores do evaporador e do condensador e usar o controlo da pressão de condensação e evaporação flutuante (CAREL INDUSTRIES 2011), (Danfoss 2012). No modelo a desenvolver nesta dissertação apenas se usa o controlo das pressões, assim sendo, neste subcapítulo apenas este tópico será abordado.

A capacidade frigorífica de um compressor altera-se ao longo do dia em função de várias variáveis, nomeadamente da pressão de aspiração e de descarga. Quanto mais próximas estiverem essas duas pressões, ou seja, quanto maior a pressão de evaporação e menor a pressão de condensação, mais otimizado é o sistema, resultado de um menor tempo de funcionamento dos compressores e consequentemente menor consumo. A solução passa por tentar manter a maior pressão de evaporação possível e a menor pressão de condensação possível (Danfoss 2012), (Singh 2005).

No controlo da pressão de sucção (evaporação) flutuante, a *set-point* da pressão varia em função da capacidade frigorífica pretendida. O sistema, automaticamente, otimiza a temperatura de evaporação em função das necessidades solicitadas, e a potência debitada pela central é a mínima indispensável. Desta forma, a central apenas consome o necessário em cada instante, o que não aconteceria se a pressão se mantivesse constante, como se pode verificar na Figura 25. No caso de não existir controlo flutuante da pressão de evaporação (pressão de evaporação constante) o seu valor rondaria o valor de projeto, isto é, o valor calculado quando a carga a remover do espaço é máxima. (período diurno e verão). Durante o ano, tal cenário é raro acontecer, o que faria a central ter um gasto de energia desnecessário noutras condições de carga. Com a implementação deste controlo, o sistema tem uma poupança de cerca 5% (CAREL INDUSTRIES 2011), (Singh 2005), (frilider 2015).

No controlo da pressão de condensação flutuante, a *set-point* da pressão varia em função da temperatura exterior, de modo a obter a menor temperatura de descarga possível e otimizar os compressores (Danfoss 2012), (Singh 2005). De modo análogo ao anterior, a central apenas consome o necessário em cada instante, o que não aconteceria se a temperatura fosse constante. Com a implementação deste controlo, o sistema tem uma poupança de cerca 10% (Singh 2005), (frilider 2015).

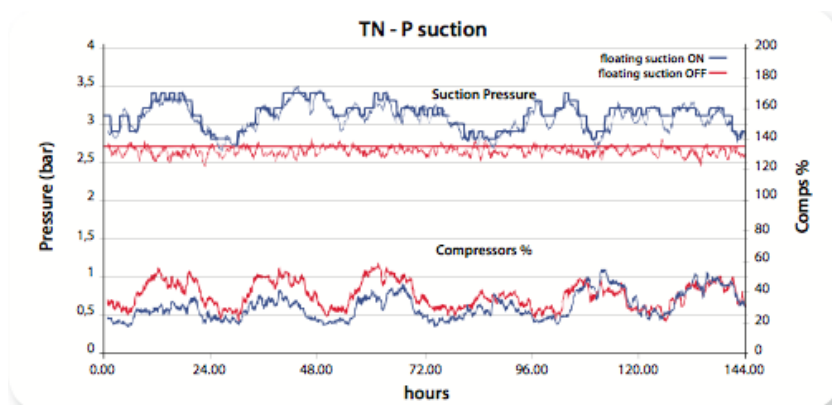


Figura 25 - Diferenças da pressão de evaporação utilizando controlo por flutuação (Danfoss 2012).

### 2.2.5 Indicador de desempenho: *Benchmarking*

***Benchmarking*** é um indicador de gestão que avalia o desempenho de uma empresa de forma comparativa e sistemática, procurando identificar e atuar nos fatores de sucesso e de insucesso. Permite avaliar o desempenho da empresa, comparativamente a um sector de atividade, e projetar o futuro definindo as ações que devem ser prioritárias (IAPMEI). Assim, tem como objetivo melhorar os processos de uma determinada empresa, analisando estratégias para vencer a concorrência.

Ao longo dos anos, tem-se assistido à utilização desta ferramenta para avaliações de desempenho em vários sectores de atividade, inclusive no setor energético, a base deste trabalho. O *benchmarking* é usado no setor da energia e consiste num indicador típico dos seus consumos que possibilita compreender como e por onde se deve distribuir o consumo energético. Tem base em dados reais, sendo reconhecendo como uma das ferramentas mais eficazes para a redução de consumos (CBCS). Os dados reais são provenientes de desempenhos energéticos de edifícios do mesmo grupo ou até de desempenhos anteriormente obtidos pelo edifício em concreto. Com estes dados, obtém-se a evolução do desempenho energético do edifício em análise, em comparação com os edifícios semelhantes. Com este paralelo, é possível avaliar qual o edifício que tem melhor desempenho e deste modo colocar em prática as suas estratégias, num edifício com pior comportamento.

Assim sendo, facilmente se percebe, que o *benchmarking* é um bom indicador da *performance* de um edifício, que possibilita uma melhoria da eficiência energética e redução dos custos operacionais.

Devido a ser um indicador por comparação, o *benchmarking* tem como desvantagem a carência de informação, ou no caso de existência, esta não ter um carácter fidedigno para efeitos de comparação. Outro problema centra-se na dificuldade de partilha de informação entre organizações semelhantes por motivos, por exemplo, de confidencialidade da informação (Loureiro 2013). Em contrapartida, existem valores típicos de *benchmarking* para algumas categorias de edifícios, como escolas, hospitais, entre outros. Estes valores servem como termo de comparação para avaliar o desempenho do edifício em estudo relativamente ao consumo típico de um edifício com a mesma tipologia. No entanto, apesar destes indicadores serem bastante úteis, não são totalmente representativos da realidade, pelo que necessitam de alguns acertos, como a taxa de ocupação dos edifícios ou o clima onde o edifício se encontra. Por exemplo, uma correção climática é uma forma de ajuste do valor, uma vez que o valor tabelado do *benchmarking* pode ter sido obtido num clima diferente do existente no local onde se encontra o edifício em estudo (Borgstein 2014). Assim, convém mencionar que os indicadores que são definidos devem permitir efetuar uma comparação justa dos vários sistemas.

Na prática, se o consumo real anual do edifício for superior ao *benchmarking* tabelado para a tipologia do edifício ou superior ao consumo espetável, conclui-se que devem ser implementadas medidas de gestão energética no edifício, no sentido de o tornar mais eficiente. Um valor inferior pode, no entanto, não garantir que o edifício esteja em grande performance, até pelo contrário. Por exemplo, se o consumo real de um edifício for inferior ao *target* (consumo teórico calculado), pode significar que alguma medida de redução de consumos foi mal implementada, ou desajustada, podendo comprometer o conforto dos ocupantes. Assim, o ideal seria que o consumo real fosse igual ao calculado, ou um valor próximo deste, tendo em conta que no cálculo do consumo teórico existem sempre aproximações que influenciam o resultado final.

No caso concreto da rede de frio de um supermercado, o *target* total corresponde à soma dos vários *targets*, isto é, ao consumo dos móveis de frio, das câmaras, dos compressores, bem como dos condensadores. Dividindo o consumo real, obtido por medições, pelo *target* total, obtém-se os valores de *benchmarking*.

### 3 Estabelecimento de correlações para o consumo da rede de frio

Neste capítulo, são mostrados os resultados obtidos na tentativa de criar correlações matemáticas entre consumos reais da rede de frio e a respetiva dimensão, tendo em conta a localização da loja.

Numa primeira fase, procedeu-se ao levantamento de dados de auditoria realizadas em várias lojas nacionais. Posteriormente, os dados obtidos foram analisados, tentando estabelecer-se uma correlação entre os mesmos. Recorreu-se ao método dos mínimos quadrados para a obtenção do ajustamento da função

A Tabela 2, mostra os dados recolhidos nas várias auditorias.

Tabela 2 - Dados recolhidos em várias auditorias

Edifício	Medições (kWh)			Período (mês)	Duração (dias)	Horas	Total metros lineares
	Neg	Pos	Total				
Sintra			3908	Setembro	1,95	46,83	123
Valbom			8782	Julho	4,99	119,83	109
Nazaré	560	1460	2020	Setembro	1,06	25,50	125
Fanzeres			3320	Julho	1,93	46,33	115
Oliveira de Azemeis	1712	1340	3052	Setembro	2,05	49,17	118
Faro			1984	Abril	1,01	24,17	125
Mafra			3184	Março	2,68	64,43	116
Quinta do Conde	769	1367	2137	Abril	1,19	28,50	125
Olhão			1760	Janeiro	0,95	22,83	123
Setubal	791	1116	1907	Fevereiro	0,96	23,00	133
Moita	1010	1015	2026	Fevereiro	1,14	27,33	124
Castelo Branco	863	1526	2389	Janeiro	1,92	46,00	121
Palmela	579	1533	2112	Janeiro	1,21	29,00	115
Santo Tirso			1865	Julho	1,15	27,67	93
Águeda			2228	Setembro	1,17	28,00	143
Vila do Conde			1992	Julho	1,20	28,83	108
Grandola	583	1232	1814	Fevereiro	0,95	22,83	117
Esposende	1397	545	1942	Setembro	1,10	26,33	140
Almeirim	1228	473	1701	Março	0,92	22,17	120
Arroja	1346	1518	2863	Novembro	1,01	24,33	119
Barreiro			1701	Março	1,03	24,83	118
Marinha Grande	3405	4181	7586	Março	3,22	77,33	126
Trofa	899	2719	3618	Julho	1,98	47,50	113
Abrantes			1858	Abril	0,88	21,17	136
Alverca	1384	2013	3396	Novembro	1,73	41,50	132
Elvas			1377	Abril	0,88	21,00	115
Loulé			2266	Abril	0,99	23,67	136
Tapada das Marcês			2528	Novembro	1,03	24,83	134
Tomar	539	1303	1841	Novembro	0,96	23,00	117
Torres Vedras			1945	Janeiro	0,88	21,17	128
Portalegre			2479	Janeiro	0,99	23,67	124

Como o período de medição varia de loja para loja, dividiu-se as medições pelo número de dias de medição de modo a obter-se o consumo real por dia. Os resultados são representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Consumo diário das várias lojas

Edifício	kWh/dia
Sintra	2003
Valbom	1759
Nazaré	1901
Fanzeres	1720
Oliveira de Azemeis	1490
Faro	1970
Mafra	1186
Quinta do Conde	1799
Olhão	1850
Setubal	1990
Moita	1779
Castelo Branco	1247
Palmela	1748
Santo Tirso	1617
Águeda	1909
Vila do Conde	1658
Grandola	1907
Esposende	1770
Almeirim	1841
Arroja	2824
Barreiro	1644
Marinha Grande	2354
Trofa	1828
Abrantes	2106
Alverca	1964
Elvas	1574
Loulé	2298
Tapada das Marcês	2443
Tomar	1921
Torres Vedras	2206
Portalegre	2514

De forma a ter em conta as diferentes localizações das lojas, bem como os diferentes períodos de medição, tentou-se obter correlações em função dos Graus-Dia de arrefecimento<sup>1</sup>, no período de medição, em vez das temperaturas exteriores no mesmo período. Para conhecer as temperaturas exteriores dos dias de medição e os Graus-Dia correspondentes, utilizaram-se bases de dados disponíveis na Internet (*wunderground e degreedays*). Foram realizadas duas tentativas, sendo que na primeira a temperatura base ( $T_b$ ) escolhida foi de 0 °C e na segunda de -30 °C. Na Tabela 4 são exibidos os vários resultados, bem como a estação meteorológica respetiva.

<sup>1</sup>Graus – Dia de arrefecimento é um parâmetro climático que pode ser definido como o somatório das diferenças de temperatura, quando esta se encontra acima de uma temperatura base Junior, A. B. and C. C. M. U. Pasa (2010) "APLICAÇÃO DO MÉTODO GRAUS-DIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES." 2..

Tabela 4 - Graus-Dia para as diferentes localizações

Edifício	Graus dias Tb=0 °C	Graus dia Tb= -30 °C	Estação
Sintra	19,7	49,7	Lisboa/Portela
Valbom	19,0	49,0	SMPC - Gondomar
Nazaré	21,9	51,9	Rua Conde de Avelar
Fanzeres	18,9	48,9	PORTO J.Tavares CT1BDS-Ham Radio
Oliveira de Azemeis	20	50	Rua Fundo D'Aldeia
Faro	18,1	48,1	Aeroporto Faro
Mafra	11,3	41,3	Mafra
Quinta do Conde	14,1	44,1	Montijo
Olhão	13,4	43,4	Cerro Azul
Setubal	9,8	39,8	Montijo
Moita	10,1	40,1	Montijo
Castelo Branco	7,4	37,4	Castelo Branco
Palmela	11,2	41,2	Montijo
Santo Tirso	21,2	51,2	Trofa
Águeda	19,1	49,1	Recardães
Vila do Conde	17,8	47,8	Povoa de Varzim
Grandola	8,2	38,2	Sines - ZIL2
Esposende	16,3	46,3	Rua Amorim Campos
Almeirim	17	47	Estrada Real
Arroja	12,8	42,8	Rua Álvaro Benamor
Barreiro	14,6	44,6	Avenida Bocage
Marinha Grande	13,1	43,1	Monte Real
Trofa	17,9	47,9	Trofa
Abrantes	13,9	43,9	Abrantes
Alverca	12,2	42,2	Lisboa - Forte da casa
Elvas	13,3	43,3	Elvas, Bairro do Revoltinho
Loulé	17,7	47,7	Rua Betunes
Tapada das Marcês	12,9	42,9	Rua Vale do Milho
Tomar	12,6	42,6	Rua Egas Moniz
Torres Vedras	11,7	41,7	Lisboa
Portalegre	12	42	Urbanizacao Lysias

Com os resultados representados nas tabelas 2, 3 e 4 foram elaborados os gráficos representados nas Figuras 26,27 e 28, tentando estabelecer-se correlações entre os mesmos.

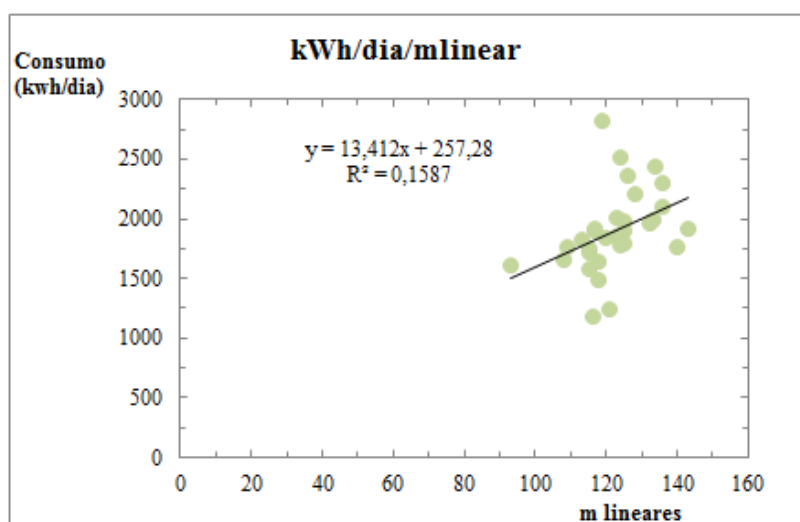


Figura 26 - Correlação entre o consumo real diário e a dimensão da rede.

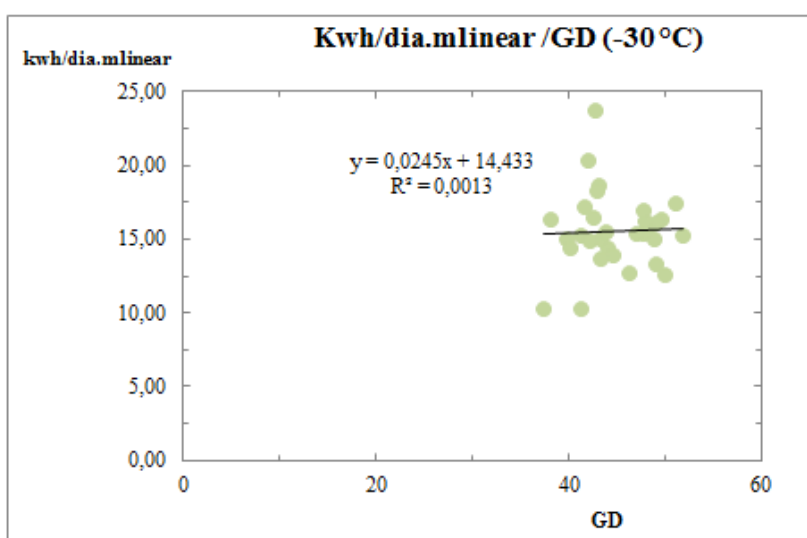


Figura 27 - Correlação entre o consumo real diário por unidade de comprimento e os Graus-Dia de arrefecimento para uma temperatura base de -30 °C.

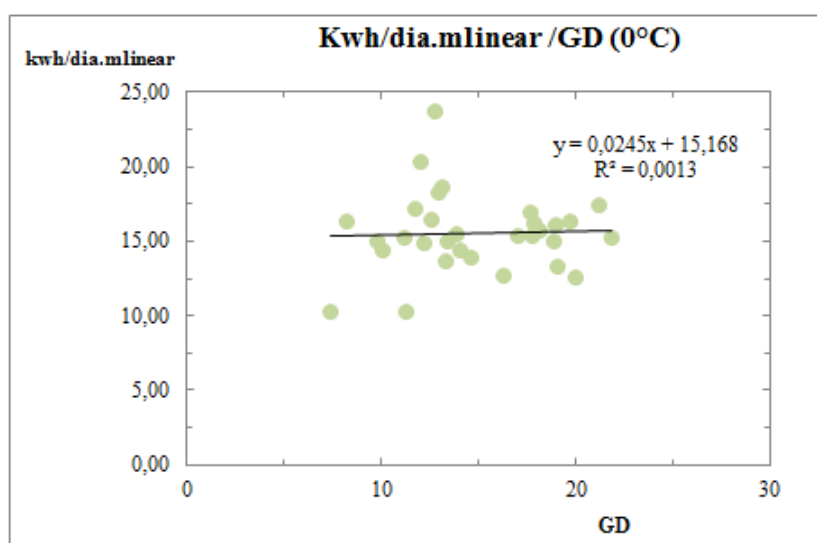


Figura 28 - Correlação entre o consumo real diário por unidade de comprimento e os Graus-Dia de arrefecimento para uma temperatura base de 0 °C.

Como se verifica, não foi possível estabelecer correlações válidas entre as variáveis pretendidas, uma vez que o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) é muito baixo. É de notar que para uma correlação ser aceitável, o coeficiente de correlação deve rondar valores entre 0,8 e 1. Quanto mais próximo o coeficiente estiver de 1, mais forte é a correlação.

Uma das razões por não se conseguir obter as correlações poderá estar na qualidade dos dados fornecidos. É difícil quantificar os metros lineares (saber como os projetistas normalmente os contabilizam, por exemplo num ilha de congelados, se é considerado o perímetro da ilha, ou apenas um dos lados), ou se as medições dos consumos elétricos foram bem efetuadas. Outra razão, é o facto de não se saber se o consumo medido engloba todos os parâmetros que para este contribuem, ou seja, o consumo medido pode quantificar apenas o consumo da central (compressores e condensadores) e não contabilizar os consumos dos móveis, sendo que nestes a dimensão é relevante. Outro fator reside no facto de nos supermercados o tipo de móveis utilizados não ser padronizável, isto é, pode acontecer que numa dada loja todos os móveis são equipados com portas e noutra nenhum móvel conter portas, ou numa loja, no circuito de negativos, se utilizar ilhas e noutra loja se utilizar murais verticais. Uma vez que a potência frigorífica por unidade de comprimento varia bastante de móvel para móvel, ou se este contém ou não portas, mesmo que duas lojas tenham a mesma dimensão, ou seja, os mesmos metros lineares, o facto de usarem móveis diferentes, altera o consumo medido. Por exemplo, um móvel vertical sem portas, em média, consome 1300 W/m, enquanto um móvel vertical com portas consome em média, 800 W/m.

Conclui-se assim, que apenas com a dimensão da rede é muito difícil estimar o consumo do sistema de frio de um supermercado.





## 4 Elaboração do modelo

Como referido nos capítulos anteriores, os sistemas de refrigeração associados à conservação de alimentos são a principal utilização de energia de um supermercado ou hipermercado. Nem sempre é fácil comparar o desempenho destes sistemas em diferentes supermercados com indicadores convencionais, como por exemplo, o consumo de energia por área de loja, pois podem conduzir a resultados enganosos, devido a fatores como clima ou *layout* não estarem em jogo na comparação. Deste modo, o objetivo deste modelo é criar um indicador que seja claro e capaz de fornecer informação sobre o consumo energético do sistema de frio de um supermercado, e desta forma, permitir uma correta hierarquização da eficiência energética destes sistemas em diferentes supermercados. Também se pretende conhecer os vários consumos desagregados do sistema de frio, e assim perceber qual ou quais os componentes que consomem mais energia.

Neste capítulo apresenta-se o modelo desenvolvido: primeiramente os pressupostos, variáveis e parâmetros usados, e numa segunda parte, a metodologia de cálculo.

No anexo A são representadas várias figuras da interface do modelo.

### 4.1 Pressupostos, variáveis e parâmetros usados

O modelo desenvolvido tem como objetivo o cálculo do *benchmarking* de supermercados. Tem como *inputs*: a dimensão da rede, volume das câmaras, classe climática da loja, tipo de ventiladores, tipo de iluminação, tipo de compressor, tipo de controlo da pressão de condensação e a inclusão de cortina noturna nos móveis. Estes *inputs* permitem ter como *outputs* todos os *targets* utilizados no cálculo do *benchmarking* (consumos elétricos anuais dos móveis, câmaras e central) e as necessidades térmicas anuais.

#### 4.1.1 Variáveis

Por vezes apenas a dimensão total da rede de frio é conhecida. No entanto, o ideal seria conhecer a dimensão da rede de positivos e da rede negativos separadamente, bem como os volumes das câmaras frigoríficas e congeladas, e se possível, qual o tipo de móveis usados, o que raramente acontece.

Quando apenas é fornecida a dimensão total da rede, definiu-se, com base na literatura da ASHRAE 2014, um comprimento total de negativos de 35% do comprimento total da rede, e consequentemente um comprimento total de positivos de 65%.

Para os casos em que não há informação sobre as plantas da loja, desenvolveu-se uma correlação, com base em auditorias realizadas em 3 supermercados diferentes, para determinar o volume total das câmaras. Verificou-se que o seu valor é cerca de 2,6 vezes superior ao total de metros lineares da rede, em que 75% corresponderão ao volume das câmaras de refrigerados e 25% ao volume das câmaras de congelados.

O tipo de móveis é uma das mais importantes variáveis a considerar, uma vez que num dado supermercado podem ser instalados vários tipos de móveis diferentes, e portanto com cargas

térmicas diferentes. Este modelo, apesar de ter a separação dos vários elementos que contribuem para a carga térmica referentes a todo o tipo de móveis, está limitado aos seguintes tipos/equipamentos, por serem os mais utilizados atualmente:

- Ilhas com porta;
- *Combis*;
- Semi-murais;
- Murais sem porta;
- Vitrinas.

Com base nos dados das auditorias, verificou-se que o comprimento médio de cada móvel (metros lineares) não variava muito. Assim sendo, definiram-se percentagens para o comprimento de cada móvel. Estas encontram-se representadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Percentagens dos comprimentos de cada móvel

Circuito	Tipo de móvel	% do total da dimensão da rede do circuito
Negativos	Ilhas com porta	11 %
	<i>Combis</i>	89 %
Positivos	Semi-murais	8 %
	Murais sem porta	78 %
	Vitrinas	14 %

De igual modo aos móveis, verificou-se que o volume médio de cada câmara não variava muito. Definiram-se também percentagens para o volume de cada móvel que se encontram representadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Percentagens dos volumes de cada câmara

Circuito	Tipo câmara	% do volume total do circuito
Negativos	Congelados	100
Positivos	Peixes e carnes	43
	Legumes, lacticínios e outros	32
	Laboratórios	25

#### 4.1.2 Cargas Térmicas

Como referido no capítulo 2, a carga térmica por unidade de comprimento, bem como as potências dos ventiladores, da iluminação, das resistências de desembaciamento e de descongelamento, são discriminadas em catálogos de fabricantes de expositores, para uma classe climática de referência. Assim, consultando vários catálogos para cada tipo de móvel, do fabricante com maior número de equipamentos instalados nos supermercados portugueses, *Bonnet Névé*, retiraram-se as várias potências médias, sendo estas utilizadas na realização do modelo para o cálculo das necessidades frigoríficas anuais e para o consumo elétrico.

No mesmo catálogo, em função da temperatura interior da loja, são fornecidos os fatores de correção para as potências, caso a temperatura interior da loja seja diferente da temperatura utilizada pelo fabricante como referência. Com estes dados, para cada móvel, estabeleceram-se correlações matemáticas dos fatores de correção em função da temperatura interior da loja. Assim, em função do valor da temperatura interior da loja, teremos um fator de correção de potência diferente, que irá influenciar a carga térmica do espaço. Estas correlações podem ser consultadas no anexo B.

Uma vez que não variam significativamente de loja para loja, a carga térmica e as restantes potências por metro cúbico das diferentes câmaras, foram estimadas recorrendo a dados de diferentes literaturas, bem como à média de vários relatórios de auditorias realizadas em três supermercados diferentes. Analogamente, definiu-se que a potência frigorífica da máquina de gelo é de 4 kW.

### ➤ **Ganhos internos**

Os ganhos internos são uma parte fundamental no cálculo das cargas térmicas dos móveis e das câmaras.

#### **Móveis**

Nos móveis, os ganhos internos desagregam-se: em iluminação, desembaciamento, descongelamento e ventilação. Para a elaboração do modelo consideram-se as seguintes hipóteses:

- O tipo de iluminação é do tipo tubular LED ou tubular fluorescente, podendo o utilizador escolher um dos tipos;
- O desembaciamento e o descongelamento é do tipo elétrico;
- Os ventiladores serão do tipo *standard* (alto consumo) ou de baixo consumo, podendo o utilizador escolher um dos tipos;
- O período de funcionamento diário dos ventiladores e das resistências de desembaciamento é 24 horas, e da iluminação é 16 horas;
- Realizam-se dois descongelamentos diários, cada um de uma hora, nos móveis negativos e nos móveis positivos do tipo vitrinas;
- Considerou-se que a potência do descongelamento apenas contribui 3% para a carga térmica, uma vez que quando este se realiza o circuito de frio é interrompido. Os 3% são contabilizados pelo ganho de temperatura do móvel que o descongelamento causa.

#### **Câmaras**

Nas câmaras, os ganhos internos resultam de: iluminação, descongelamento, ventilação, produtos, empilhadores e cargas relativas ao calor libertado por trabalhadores (pessoal). Para a elaboração do modelo consideram-se as seguintes hipóteses:

- O tipo de iluminação é do tipo tubular fluorescente;
- Os ventiladores são de baixo consumo;
- O descongelamento é do tipo elétrico;
- O período diário de funcionamento dos ventiladores é 24 horas e da iluminação é 4 horas;
- Realizam-se dois descongelamentos diários, cada um de uma hora, nas câmaras de congelados;
- O *stock* é repostado 4 vezes por dia, o que se traduz num tempo de funcionamento dos empilhadores e das pessoas dentro das câmaras de 4 horas;
- De igual modo aos móveis, apenas 3% da potência do descongelamento é considerada.

### ➤ Ganhos externos

Os ganhos relativamente ao espaço dependem muito da temperatura interior da loja, que por sua vez, está diretamente relacionada com a classe climática. Assim sendo, definiram-se 4 classes climáticas representadas na Tabela 7. Considera-se que, dependendo da classe selecionada pelo utilizador, a temperatura do interior da loja mantém-se constante na estação do ano em vigor. A única exceção é a classe de referência, onde a temperatura se mantém constante todo o ano.

Tabela 7 - Classes climáticas

Classe	I			II			III			Referência
	Inverno	Meia-Estação	Verão	Inverno	Meia-Estação	Verão	Inverno	Meia-Estação	Verão	
T (°C)	22	23	24	20	22,5	25	18	22	26	25

Sabe-se também que a temperatura do interior da loja varia consoante a temperatura exterior. No entanto, as classes climáticas definidas em cima, não consideram tal variante, acabando por ser aproximações mais grosseiras. Para considerar as flutuações da temperatura da loja ao longo de todas as horas anuais, definiu-se ainda a classe *peak shaving*. Sabendo as temperaturas exteriores, em todas as horas do ano, para uma determinada localização (temperaturas típicas de localização) o utilizador seleciona esta classe climática, e através de uma correlação matemática, as temperaturas do interior da loja variam. A correlação matemática é explicada no subcapítulo 4.1.4.

O período noturno deverá também ser considerado, uma vez que difere bastante do diurno. A iluminação e movimentação da loja, abertura das portas dos móveis e cortinas noturnas quando usadas, são também variáveis a ter em conta, uma vez que influenciam a carga referente às infiltrações. Assim, definiu-se que:

- Nos móveis onde são instaladas cortinas noturnas, a carga referente ao espaço reduz 50%;
- Em todos os móveis, no período noturno, a carga referente ao espaço reduz 20%.

#### 4.1.3 Central

Para a central definiu-se:

- Um coeficiente de segurança de 10% sobre a capacidade frigorífica total para dimensionar os compressores;
- O fluido frigorigénio a utilizar, em ambos os circuitos, é R404A;
- O compressor é do tipo alternativo semi-hermético, ou parafuso semi-hermético, podendo o utilizador escolher um dos tipos;
- O condensador é arrefecido a ar;
- Um sobreaquecimento de 10 °C;
- Utilização de um “*rack*” com 3 compressores iguais e um condensador para cada circuito;
- Temperatura de evaporação constante de -15 °C para positivos e -35 °C para negativos;
- O controlo da temperatura de condensação pode ser constante ou flutuante, podendo o utilizador escolher um deles. A forma de obtenção deste controlo será alvo de análise no subcapítulo 4.1.4.

#### 4.1.4 Outros Parâmetros

##### ➤ *Peak shaving*

Como referido anteriormente, a classe climática *Peak shaving* é utilizada para se contabilizar as flutuações da temperatura do interior da loja ao longo do dia. A empresa “Edifícios Saudáveis”, com a sua experiencia, sabe que o sistema de ar-condicionado apenas é ligado nos picos de temperatura. Este efeito foi contabilizado, de forma a tornar o modelo mais próximo possível da realidade. Para tal, definiram-se dois limites de temperaturas: como limite mínimo 17 °C e como limite máximo 26 °C. Assim, sempre que a temperatura da loja for menor que 17 °C o ar-condicionado liga para aquecer, e de maneira análoga, quando a temperatura da loja for maior que 26 °C o espaço é arrefecido.

Para tornar mais realista e fazer com que a temperatura no interior se altere em função da temperatura exterior, adotou-se um amortecimento da temperatura exterior de 95 %, devido à inércia do edifício. A equação 4.1 representa matematicamente o cálculo da temperatura do interior da loja para cada hora, contabilizando todos os efeitos:

$$T_{\text{hora},i} = T_{\text{hora},i-1} + 0,05 \times (T_{\text{ext},i} - T_{\text{hora},i-1}) \quad (4.1)$$

Onde,

$T_{\text{hora},i}$  , é a temperatura no interior da loja

$T_{\text{ext}}$  , é a temperatura exterior, e

$i$  é o índice que representa cada uma das horas do ano.

Assim:

Se  $T_{\text{hora},i} < 17$ ,  $T_{\text{hora},i}$  toma o valor de 17

Se  $T_{\text{hora},i} > 26$ ,  $T_{\text{hora},i}$  toma o valor de 26

Se  $17 < T_{\text{hora},i} < 26$ ,  $T_{\text{hora},i}$  toma um valor dentro dos limites.

##### ➤ **Temperatura de condensação**

O controlo da temperatura de condensação pode ser constante ou flutuante e depende da temperatura exterior. No controlo constante, a temperatura de condensação não está sempre no mesmo valor, mas terá pequenas flutuações. O objetivo deste controlo é minimizar as flutuações, de modo a que a temperatura ronde o *set-point*. Sabe-se também, que a temperatura de condensação tende a diminuir no inverno e a aumentar no verão, segundo uma função do tipo  $1/x$ . Com base nisto, definiu-se uma correlação matemática para valores de temperatura exterior inferiores a 25 °C, e outra para valores superiores a 25 °C, de modo a satisfazer o comportamento deste controlo.

No controlo flutuante, a temperatura de condensação altera-se em função da temperatura exterior, com o objetivo de ser o mais baixa possível. Definiu-se, um  $\Delta T$  constante de 12 °C. Assim, para cada hora do ano, que esta toma valores calculados a partir da equação 4.2.

$$T_{\text{cond},i} = T_{\text{ext},i} + 12 \quad (4.2)$$

Onde,

$T_{\text{cond},i}$  , representa a temperatura de condensação

$T_{\text{ext},i}$  , representa a temperatura exterior, e

i é o índice que representa cada uma das horas do ano.

## 4.2 Metodologia de cálculo

Para o cálculo do *benchmarking* é necessário calcular os vários *targets* dos sistemas energéticos relevantes. Estes são:

- Consumo elétrico dos móveis;
- Consumo elétrico das câmaras;
- Consumo elétrico da central (compressores e condensador).

Para tal, é explicado de seguida a metodologia de cálculo utilizada na realização do modelo. A Figura 29 ajuda a perceber a desagregação do consumo elétrico total da central e os vários parâmetros de que cada consumo depende.

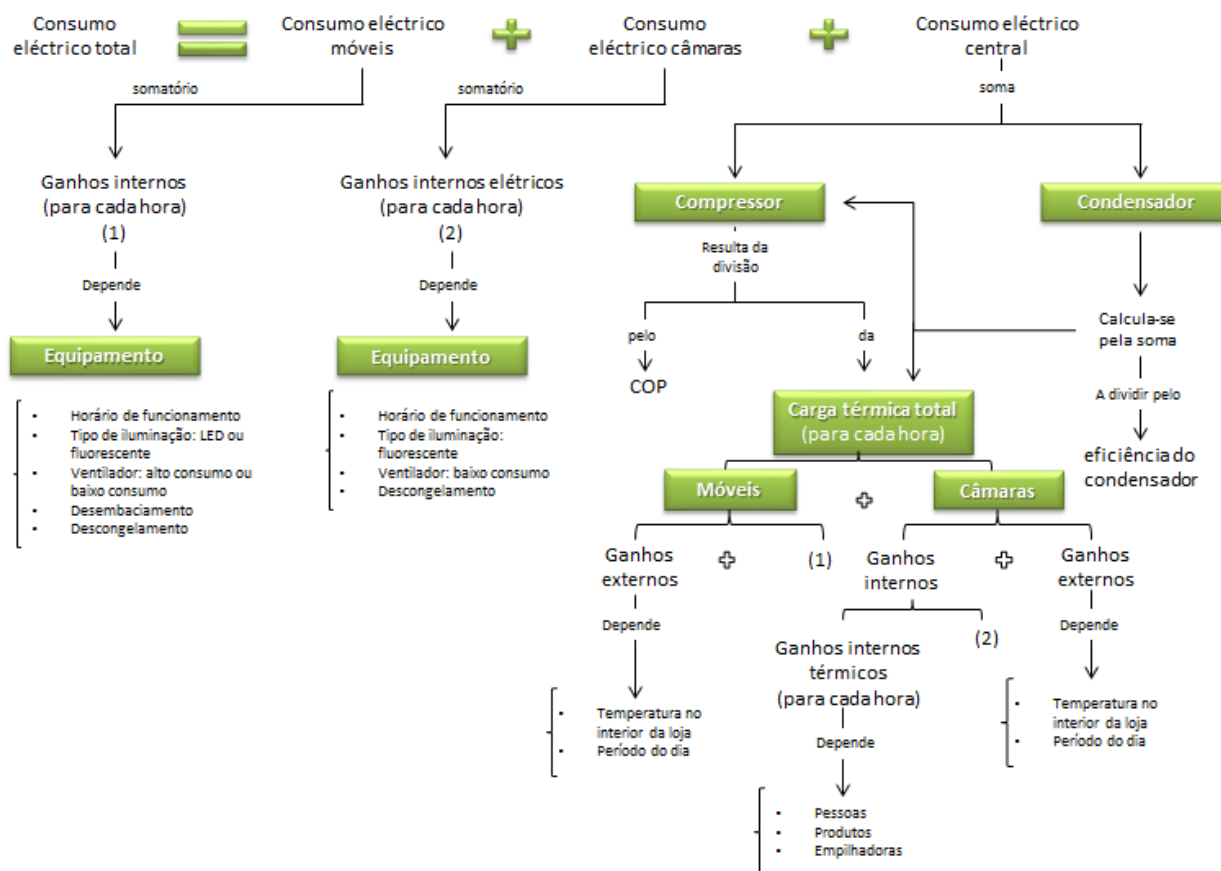


Figura 29- Representação da metodologia de cálculo do consumo elétrico anual.

### Móveis

A capacidade frigorífica é a potência que o evaporador necessita de retirar do móvel para manter neste as temperaturas desejáveis. Deve ser igual ou superior à carga térmica, sendo esta, a soma dos ganhos internos (potências de iluminação, ventilação, desembaciamento e descongelamento) e dos ganhos relativamente ao espaço. A carga térmica varia ao longo do dia, dependendo não só do número de equipamentos ligados, mas sobretudo, da variação da temperatura no interior da loja. Pelos catálogos é possível saber a carga térmica nas condições de referência. No entanto, esta não terá em conta as variações da temperatura no interior da loja. Assim sendo, será necessário calcular a carga térmica tendo em conta a influência dessa condição. Para isso, primeiro deverá ser determinado os ganhos externos nas condições de

referência (25°C). Para tal, basta subtrair à carga térmica, nas condições de referência, os vários ganhos internos (nas condições de referência), de acordo com a equação 4.3.

$$\dot{G}_E = \dot{Q}_{ct} - \sum \dot{G}_I \quad (4.3)$$

Onde:

$\dot{G}_E$  é a carga térmica referente ao espaço

$\dot{Q}_{ct}$  é a carga térmica total a remover do móvel, e

$\dot{G}_I$ , são os ganho internos em W/m.

Os ganhos do espaço irão variar muito com a temperatura no interior da loja. Além disso terão de ser contempladas, as diferentes condições de funcionamento a que o edifício estará sujeito, e que serão função da hora. Estas diferenças são particularmente visíveis no período da noite, onde não existe circulação de pessoas, a iluminação da loja e as infiltrações são reduzidas e a própria temperatura no interior da loja é menor. Aplicando os fatores de correção para as diferentes temperaturas, obtidos pelas correlações criadas, conhecem-se os ganhos externos para cada hora específica do dia. É importante referir que, durante o período noturno, terá de ser considerado um fator de correção extra, por forma a incluir as características próprias desse período e que foram discriminadas anteriormente. Os ganhos externos obtidos dependerão da classe climatérica escolhida. Assim, durante o dia, os ganhos externos são constantes ao longo de todo o ano para a classe de referência, constantes para cada uma das estações nas classes I, II e III, e variável em todas as horas do ano na classe *peak shaving*. Durante a noite, verifica-se uma redução dos ganhos externos, para todas as classes (tal como referido no subcapítulo anterior).

Por sua vez, os ganhos internos são constantes para todos os dias do ano, embora apresentem variações ao longo do dia (dependendo dos equipamentos ativos no móvel a cada hora). Somando estes aos vários ganhos externos (equação 4.4) e multiplicando pelo comprimento total do móvel, obtém-se a carga térmica total a remover de cada móvel, para as 8760 horas do ano, contabilizando todas as variantes. Somando-as, obtém-se assim, as necessidades térmicas anuais para cada tipo de móvel (equação 4.5).

Matematicamente, para cada móvel, tem-se:

$$\dot{Q}_{ct,i} = \dot{G}_I + \dot{G}_{E_i} \quad (4.4)$$

Onde:

$\dot{G}_{E_i}$  é a carga térmica referente ao espaço

$\dot{Q}_{ct,i}$  é a carga térmica total a remover

$\dot{G}_I$  os ganhos internos, e

$i$  é o índice que representa cada uma das horas do ano.

$$\text{Necessidades} = \sum_{i=1}^{8760} \dot{Q}_{ct,i} \times c \quad (4.5)$$

Onde:

$\dot{Q}_{ct,i}$  é a carga térmica total a remover do móvel, e

$c$ , representa o comprimento total do móvel.

É de salientar, que no cálculo da carga térmica para cada hora do ano, se teve em conta as várias combinações possíveis de ganhos internos e externos. As combinações possíveis para ganhos internos são:

- Ventilador de baixo consumo e iluminação do tipo LED;
- Ventilador de alto consumo e iluminação do tipo LED;
- Ventilador de baixo consumo e iluminação do tipo fluorescente;
- Ventilador de alto consumo e iluminação do tipo fluorescente.

Nos ganhos externos, pode-se definir se o móvel possui cortina noturna ou não, afetando sempre os ganhos em função da classe climática escolhida.

Analogamente às necessidades térmicas, soma-se as potências de iluminação, ventilação, desembaciamento e descongelamento para todas as horas do ano e, multiplicando pelo comprimento do móvel, obtém-se o consumo elétrico anual para cada tipo de móvel (equação 4.6). De igual modo, respeitou-se também, as várias combinações de ganhos internos descritos acima.

$$CEM = \sum_{i=1}^{8760} (\dot{W}_{iluminação,i} + \dot{W}_{ventilação,i} + \dot{W}_{desembaciamento,i} + \dot{W}_{descongelamento,i}) \times c \quad (4.6)$$

Onde:

CEM, é o consumo elétrico de um móvel,

$\dot{W}_{iluminação,i}$ , é a potência de iluminação

$\dot{W}_{ventilação,i}$ , é a potência de ventilação

$\dot{W}_{desembaciamento,i}$ , é a potência das resistências de desembaciamento,

$\dot{W}_{descongelamento,i}$ , é a potência das resistências de descongelamento,

$i$  é o índice que representa cada uma das horas do ano, e

$c$  representa o comprimento total do móvel.

Resumindo:

- Em primeiro lugar, subtraindo a carga térmica total a 25 °C aos ganhos internos, obtém-se a carga a remover ao espaço a 25 °C;
- De seguida, através de correlações, calcula-se para cada hora a carga referente ao espaço, dependendo do período do dia e da classe climática selecionada (Tabela 8);
- Depois, calcula-se a carga térmica horária (soma dos ganhos internos e externos) dependendo do tipo de combinação (iluminação e ventilador) selecionado pelo utilizador (Tabela 8);
- Soma-se as cargas térmicas para todas as horas do ano, multiplica-se pelo comprimento total do móvel e obtém-se as necessidades anuais (Tabela 9);
- Para o cálculo do consumo elétrico anual o procedimento é igual ao último ponto, somando apenas as potências de iluminação, ventilação, desembaciamento e descongelamento (Tabela 9)



Tabela 8 - Metodologia de cálculo das cargas térmicas para os móveis

horas	carga térmica (w/m)	ventiladores		desembaciamento (w/m)	iluminação		descongelamento (w/m)	espaço (w/m)
		baixo consumo (w/m)	alto consumo (w/m)		T5 (w/m)	LED (w/m)		
0	237	20	85	0	0	0	1250	180
1	200	20	85	0	0	0	0	180
2	200	20	85	0	0	0	0	180
3	200	20	85	0	0	0	0	180
4	200	20	85	0	0	0	0	180
5	200	20	85	0	0	0	0	180
6	237	20	85	0	0	0	1250	180
7	210	20	85	0	0	0	0	190
8	450	20	85	0	50	15	0	380
9	450	20	85	0	50	15	0	380
10	450	20	85	0	50	15	0	380
11	450	20	85	0	50	15	0	380
12	450	20	85	0	50	15	0	380
13	450	20	85	0	50	15	0	380
14	450	20	85	0	50	15	0	380
15	450	20	85	0	50	15	0	380
16	450	20	85	0	50	15	0	380
17	450	20	85	0	50	15	0	380
18	450	20	85	0	50	15	0	380
19	450	20	85	0	50	15	0	380
20	450	20	85	0	50	15	0	380
21	450	20	85	0	50	15	0	380
22	450	20	85	0	50	15	0	380
23	450	20	85	0	50	15	0	380

A Tabela 8 mostra um exemplo de cálculo das cargas térmicas de um móvel em particular, que permite compreender melhor a explicação anterior. A área a vermelho representa o período noturno. No interior do retângulo azul, verifica-se que as cargas térmicas da loja durante este período são diferentes das restantes. Tal facto é explicado, pois estas são afetadas pelo fator de correção do período noturno, bem como, pela existência de cortinas noturnas. É de salientar que as cargas referentes ao espaço mudam dependendo da classe selecionada que neste caso, será a classe de referência. As restantes (ganhos internos) são constantes para todos os dias do ano. A carga térmica total, para uma dada hora, (célula a cinzento) é a soma das potências dos ventiladores, desembaciamento, iluminação, descongelamento e espaço.

Tabela 9 - Metodologia de cálculo das necessidades e dos consumos elétricos anuais dos móveis

horas	carga térmica (w/m)	ventiladores		desembaciamento (w/m)	iluminação		descongelamento (w/m)	espaço (w/m)
		baixo consumo (w/m)	alto consumo (w/m)		T5 (w/m)	LED (w/m)		
0	237	20	85	0	0	0	1250	180
1	200	20	85	0	0	0	0	180
2	200	20	85	0	0	0	0	180
3	200	20	85	0	0	0	0	180
4	200	20	85	0	0	0	0	180
5	200	20	85	0	0	0	0	180
6	237	20	85	0	0	0	1250	180
7	210	20	85	0	0	0	0	190
8	450	20	85	0	50	15	0	380
9	450	20	85	0	50	15	0	380
10	450	20	85	0	50	15	0	380
11	450	20	85	0	50	15	0	380
12	450	20	85	0	50	15	0	380
13	450	20	85	0	50	15	0	380
14	450	20	85	0	50	15	0	380
15	450	20	85	0	50	15	0	380
16	450	20	85	0	50	15	0	380
17	450	20	85	0	50	15	0	380
18	450	20	85	0	50	15	0	380
19	450	20	85	0	50	15	0	380
20	450	20	85	0	50	15	0	380
21	450	20	85	0	50	15	0	380
22	450	20	85	0	50	15	0	380
23	450	20	85	0	50	15	0	380

A Tabela 9 é a continuação da Tabela 8 e representa um exemplo de cálculo das necessidades térmicas anuais e do consumo elétrico anual de um móvel. Somando todas as linhas da área a amarelo (8760 linhas, pois um ano contém 8760 horas) e multiplicando pelo comprimento do móvel em questão, obtém-se as necessidades térmicas anuais para o móvel em questão. Fazendo esta operação para todos os móveis e somando-os, obtém-se as necessidades totais para os móveis. Somando a estes, as necessidades das câmaras, obtém-se a necessidade de frio total da rede.

Na área a roxo estão representados os parâmetros que contribuem para o consumo elétrico do móvel. Dependendo da combinação a usar (tipo de iluminação e ventilador) somam-se os vários parâmetros (ventiladores, iluminação, desembaciamento e descongelamento) para as 8760 horas e, multiplicando pelo comprimento do móvel, obtém-se o consumo elétrico anual do móvel em questão. Analogamente às necessidades realiza-se esta operação para todos os móveis, que somados representam o consumo elétrico anual total dos móveis.

### Câmaras

A metodologia de cálculo das necessidades térmicas anuais e do consumo elétrico anual para as câmaras é semelhante à usada para os móveis. A única diferença reside no facto de se conhecer a carga térmica e restantes potências, não por unidade de comprimento, mas sim por unidade de volume. Às necessidades acrescenta-se a potência libertada pelos produtos, empilhadores e pessoas. Neste caso, no consumo elétrico não entram resistências de desembaciamento, uma vez que nas câmaras estas não são usadas.

### Central

Somando, para todas as horas do ano e para cada circuito, as várias cargas térmicas de cada móvel e de cada câmara, obtém-se a capacidade frigorífica necessária para cada central. Esta corresponde ao valor máximo para uma determinada hora do ano. Multiplicando os dez por cento de segurança (estabelecido nos pressupostos) à capacidade necessária, sabe-se qual a potência que o *rack* de compressores tem de fornecer para satisfazer as necessidades pretendidas. Como se definiu que cada *rack* tem 3 compressores iguais, dividindo a potência máxima necessária por três, obtém-se a potência máxima necessária de cada compressor.

Na prática, o número de compressores em funcionamento, varia de acordo com a capacidade frigorífica necessária para cada instante. Por exemplo, se a capacidade frigorífica para uma determinada hora for 45 kW, e cada compressor fornecer 50 kW, o que no total corresponde a uma potência de 150 kW (50x3), apenas é necessário um compressor em funcionamento, já que sozinho consegue suportar as necessidades para aquela hora. O número de compressores ativos é dado pela equação 4.7.

$$n_i = \frac{\dot{Q}_{ct,total,i}}{\dot{W}_{c,i}} \quad (4.7)$$

Onde:

$n_i$ , é o número de compressores activos

$\dot{Q}_{cti}$  é a carga térmica total (soma dos móveis e câmaras) a remover

$\dot{W}_{c,i}$  é a potência de um compressor, e

$i$  é o índice que representa cada uma das horas do ano.

Em que, no caso de:

- $n \leq 1$ ,  $n$  toma o valor 1;
- $n > 2$ ,  $n$  toma o valor 3;
- $1 > n \leq 2$ ,  $n$  toma o valor 2.

O consumo elétrico dos compressores, a cada hora é dado, por (equação 4.8):

$$\dot{W}_{ele,i} = \frac{\dot{Q}_{ct,total,i}}{COP_i} \quad (4.8)$$

Onde:

$\dot{W}_{ele,i}$ , representa a potência eléctrica do compressor

$\dot{Q}_{ct,total,i}$ , é a carga térmica total a remover

$COP_i$ , o COP da instalação, e

$i$  é o índice que representa cada uma das horas do ano.

O COP é calculado através de uma correlação obtida com base no *software* da “Bitzer”, fabricante mais comum de compressores utilizados em instalações frigoríficas. Sabe-se que o COP vai diminuindo à medida que a temperatura de condensação aumenta. Assim, para uma temperatura de evaporação constante, obteve-se a correlação do COP para cada um dos compressores em função da temperatura de condensação. As várias correlações podem ser consultadas no anexo B.

Somando as potências elétricas para todas as horas do ano, obtém-se o consumo elétrico anual dos compressores, como indicado na equação 4.9:

$$\text{Consumo elétrico anual compressores} = \sum_{i=1}^{8760} \dot{W}_{ele,i} \quad (4.9)$$

A Tabela 10 representa o cálculo da potência eléctrica dos compressores para um dia. O retângulo azul representa a soma de todas as cargas térmicas do circuito de negativos (móveis + câmaras) para a hora 1 de um determinado dia. O mesmo processo se repete para as restantes horas e para o circuito de positivos. O retângulo vermelho representa o COP para circuito de negativos para aquela hora. Este é obtido por uma correlação (anexo B- Figura 59, neste caso, compressor do tipo pistão para temperatura de evaporação constante a  $-35^{\circ}\text{C}$ ) em função da temperatura de condensação correspondente àquela hora. O retângulo amarelo representa o consumo elétrico do compressor para a hora 1. É obtido através da equação 4.8. Por fim, somando os 8760 valores contidos no retângulo roxo, obtém-se o consumo elétrico anual dos compressores no circuito de positivos. Fazendo de igual modo para o circuito de negativos, obtém-se o consumo elétrico anual dos compressores no circuito de negativos. É de salientar que os valores do COP e do consumo dos compressores variam em função do tipo de compressores a usar, do tipo de controlo da temperatura de condensação, bem como das cargas térmicas totais, sendo que a variação destas últimas, já foi explicada anteriormente.

Tabela 10 - Metodologia de cálculo do consumo elétrico anual dos compressores

horas	Qct (kWh)		COP		Consumo compressores (kWh)	
	negativos	positivos	Negativos	Positivos	Negativos	Positivos
0	28	54	1,63	2,92	17	18
1	26	53	2,04	3,58	13	15
2	26	53	1,81	3,21	14	17
3	26	53	1,96	3,45	13	15
4	26	53	2,09	3,65	12	15
5	26	53	1,96	3,45	13	15
6	28	54	1,99	3,49	14	15
7	31	70	1,87	3,31	16	21
8	34	109	1,70	3,03	20	36
9	34	109	2,35	4,06	15	27
10	34	107	2,06	3,62	16	30
11	34	107	1,74	3,10	19	34
12	34	107	1,63	2,92	21	37
13	34	107	1,89	3,35	18	32
14	34	107	1,74	3,09	19	35
15	34	107	1,95	3,43	17	31
16	34	107	1,73	3,08	19	35
17	34	107	1,81	3,22	19	33
18	34	107	1,63	2,92	21	37
19	34	109	1,90	3,35	18	33
20	34	109	1,90	3,35	18	33
21	34	107	1,68	2,99	20	36
22	34	107	2,33	4,04	14	26
23	30	96	2,28	3,95	13	24

A função do condensador é rejeitar todo o calor fornecido ao fluido frigorigénio durante todo o processo, ou seja, rejeitar o calor absorvido pelo evaporador e o calor adicionado pelo compressor. Somando, para cada hora, a potência dos compressores e a carga térmica total, obtém-se a potência que o condensador deve rejeitar hora a hora (equação 4.10), ou seja:

$$\dot{Q}_{\text{cond},i} = \dot{Q}_{\text{ct,total},i} + \dot{W}_{\text{ele},i} \quad (4.10)$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{cond},i}$ , representa a potência térmica que o condensador de rejeitar

$\dot{Q}_{\text{ct,total},i}$  é a carga térmica total a remover, e

$\dot{W}_{\text{ele},i}$ , representa a potência eléctrica do compressor

O consumo eléctrico dos condensadores é dado por (equação 4.11):

$$\dot{Q}_{\text{cond,ele},i} = \frac{\dot{Q}_{\text{cond},i}}{\varepsilon_{\text{cond},i}} \quad (4.11)$$

Onde:

$\dot{Q}_{\text{cond,ele},i}$ , representa a potência eléctrica (potência absorvida) do condensador

$\dot{Q}_{\text{cond},i}$ , representa a potência térmica que o condensador de rejeitar, e

$\varepsilon_{\text{cond},i}$ , a eficiência do condensador.

Somando o consumo elétrico para todas as horas do ano, obtém-se o consumo elétrico anual dos condensadores, como indicado na equação 4.12.

$$\text{Consumo elétrico anual compressores} = \sum_{i=1}^{8760} \dot{Q}_{cond,ele,i} \quad (4.12)$$

A eficiência do condensador é calculada através de uma correlação obtida com base no *software* da “Centaurus”, fabricante mais comum de condensadores utilizados em instalações frigoríficas. A correlação encontra-se no anexo B- Figura 60.

A Tabela 11 representa o cálculo da potência elétrica dos condensadores para um dia. O retângulo a vermelho representa a potência térmica que o condensador deve rejeitar e, de acordo com a equação 4.10, resulta da soma dos retângulos azul e amarelo. O retângulo cinzento representa a eficiência do condensador para o circuito de positivos para aquela hora. Este é obtido por uma correlação (anexo B- Figura 60) em função da temperatura de condensação correspondente àquela hora. A área representada a roxo indica, para cada hora, o consumo elétrico do condensador no circuito de positivos. Este é obtido através da equação 4.11, como referido anteriormente. Somando as 8760 linhas, obtém-se o consumo elétrico anual do condensador. Repetindo o processo para o circuito de negativos, obtém-se o consumo elétrico anual do equipamento no circuito de negativos.

Tabela 11 - Metodologia de cálculo do consumo elétrico anual dos condensadores

horas	Qct (kWh)		Consumo compressores (kWh)		Qcond (kWh)		ε		Qcond,ele (kWh)	
	negativos	positivos	Negativos	Positivos	Negativos	Positivos	Neg	Pos	Neg	Pos
0	28	54	17	18	45	72	210,0	210,0	0,21	0,34
1	26	53	13	15	38	68	188,3	188,3	0,20	0,36
2	26	53	14	17	40	70	230,7	230,7	0,17	0,30
3	26	53	13	15	39	69	207,5	207,5	0,19	0,33
4	26	53	12	15	38	68	192,1	192,1	0,20	0,35
5	26	53	13	15	39	69	217,0	217,0	0,18	0,32
6	28	54	14	15	42	69	216,6	216,6	0,19	0,32
7	31	70	16	21	47	91	267,5	267,5	0,18	0,34
8	34	109	20	36	55	145	289,2	289,2	0,19	0,50
9	34	109	15	27	49	136	172,3	172,3	0,28	0,79
10	34	107	16	30	50	136	183,0	183,0	0,27	0,74
11	34	107	19	34	53	141	207,2	207,2	0,26	0,68
12	34	107	21	37	54	143	221,0	221,0	0,25	0,65
13	34	107	18	32	51	139	148,1	148,1	0,35	0,94
14	34	107	19	35	53	141	176,9	176,9	0,30	0,80
15	34	107	17	31	51	138	139,2	139,2	0,37	0,99
16	34	107	19	35	53	141	177,8	177,8	0,30	0,80
17	34	107	19	33	52	140	172,8	172,8	0,30	0,81
18	34	107	21	37	54	143	214,2	214,2	0,25	0,67
19	34	109	18	33	52	142	189,3	189,3	0,28	0,75
20	34	109	18	33	52	142	210,6	210,6	0,25	0,67
21	34	107	20	36	54	142	241,0	241,0	0,22	0,59
22	34	107	14	26	48	133	174,7	174,7	0,27	0,76
23	30	96	13	24	43	120	192,7	192,7	0,22	0,62

***Benchmarking***

Como referido no capítulo 2, o *benchmarking* em supermercados é uma ferramenta de gestão que dá informação sobre a eficiência energética deste.

Conhecidos os *targets* dos vários sistemas energéticos relevantes e o consumo elétrico real da central do supermercado é possível calcular este indicador. Este último é conhecido através de medições realizadas no local.

Assim, o *benchmarking* é dado por (equação 4.13):

$$benchmarking = \frac{\text{consumo real}}{\sum \text{targets}} \quad (4.13)$$

O somatório dos vários *targets* é a soma do consumo elétrico anual da central, dos móveis e das câmaras.

## 5 Caso de estudo- Aplicação do modelo

Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação do modelo desenvolvido em duas lojas portuguesas.

### 5.1 Caso A

Os dados disponíveis sobre a loja, situada no centro do país, encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados da loja situada no centro do país

Circuito	Positivos	Negativos
Dimensão (metros lineares)	88,8	44,4
Tipo iluminação móveis	Fluorescente	Fluorescente
Ventiladores móveis	Baixo Consumo	Baixo Consumo
Cortinas Noturnas	Possui	Possui
Tipo de compressor	Pistão	Pistão
Controlo Temperatura Condensação	Constante	Constante
Consumo real (MWh/ano)	474	386

Como não foi fornecida nenhuma planta da loja, o cálculo dos volumes das câmaras foi estimado recorrendo à correlação criada, como referido no capítulo 4. Os restantes dados foram fornecidos por um relatório de auditoria.

No cálculo dos consumos espectáveis e das necessidades, a classe climática utilizada foi a classe *peak shaving*, de modo a tornar os resultados o mais realistas possível.

#### 5.1.1 Resultados

Na Tabela 13 apresentam-se os vários resultados obtidos pelo modelo desenvolvido.

Tabela 13 - Resultados obtidos no caso A

Circuito	Positivos	Negativos
Necessidades Térmicas anuais (MWh/ano)	797	278
Consumo elétrico anual (MWh/ano)	386	369
<i>Benchmarking</i>	1,23	1,04

De modo a perceber em que componentes deverão ser aplicadas medidas de melhoramento da eficiência energética, no sentido de reduzir os consumos, é necessário conhecer a sua desagregação. Assim, na Tabela 14 estão representados os resultados obtidos pelo modelo para os diferentes equipamentos analisados e na Tabela 15 pode-se verificar as necessidades térmicas anuais dos móveis e das câmaras.

Tabela 14 - Consumos elétricos obtidos o caso A

Consumos Elétricos Anuais (MWh/ano)		
Circuito	Positivos	Negativos
Compressores	253,9	155,1
Condensador	8,3	3,4
Móveis	96,6	203,4
Câmaras	27,5	7,2

Tabela 15 - Necessidades térmicas anuais obtidas no caso A

Necessidades Térmicas Anuais (MWh/ano)		
Circuito	Positivos	Negativos
Móveis	555	235
Câmaras	243	41

Além disso, para uma caracterização mais completa da instalação, é também importante conhecer a contribuição de cada equipamento, em termos percentuais.

Para os **consumos elétricos - Targets**:

A Figura 30 representa a desagregação dos consumos elétricos anuais por circuitos. Como se pode verificar a central de positivos consome mais que a central de negativos, no entanto a diferença é pouco significativa.

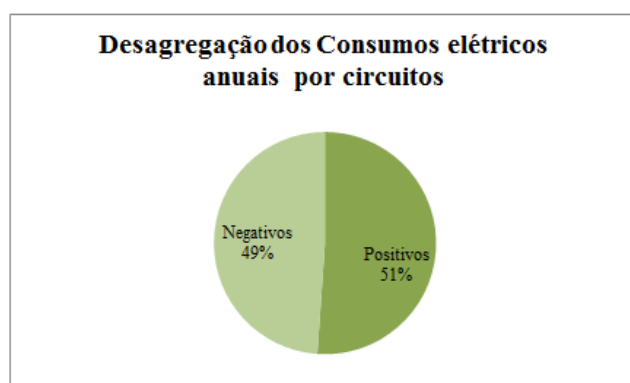


Figura 30 - Percentagem dos consumos elétricos anuais obtidos no caso A.

A Figura 31 representa a desagregação dos consumos elétricos do circuito de positivos e negativos. Fazendo assim uma análise mais detalhada a cada um dos circuitos, verifica-se que, no circuito de positivos, os compressores são os equipamentos que mais consomem. Por outro



lado, para o circuito de negativos os móveis são o componente que apresenta maior consumo (55%).

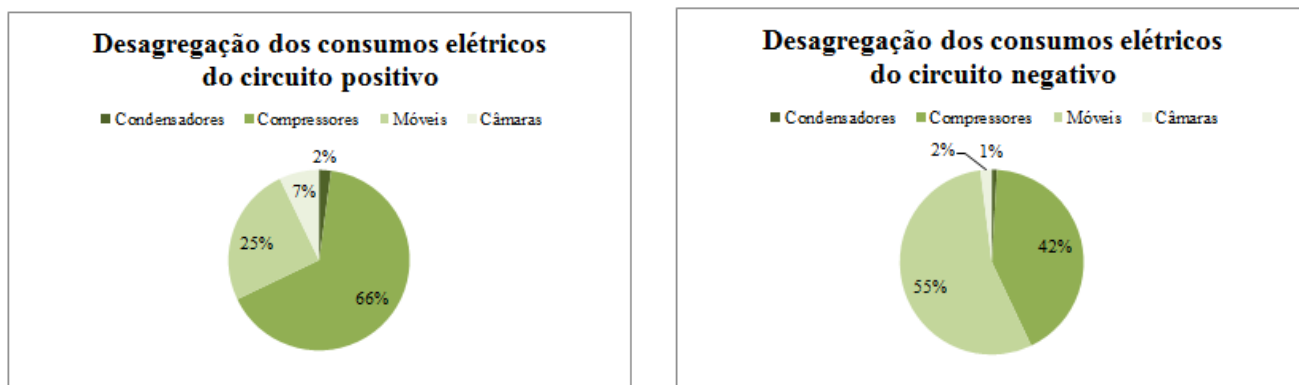


Figura 31 - Desagregação dos consumos elétricos anuais obtidos para os dois circuitos no caso A.

A Figura 32 representa a desagregação dos consumos elétricos dos móveis do circuito de positivos e negativos. No circuito de positivos a iluminação é o sistema que mais consome, ao inverso do circuito de negativos, onde as resistências de desembaciamento se destacam.

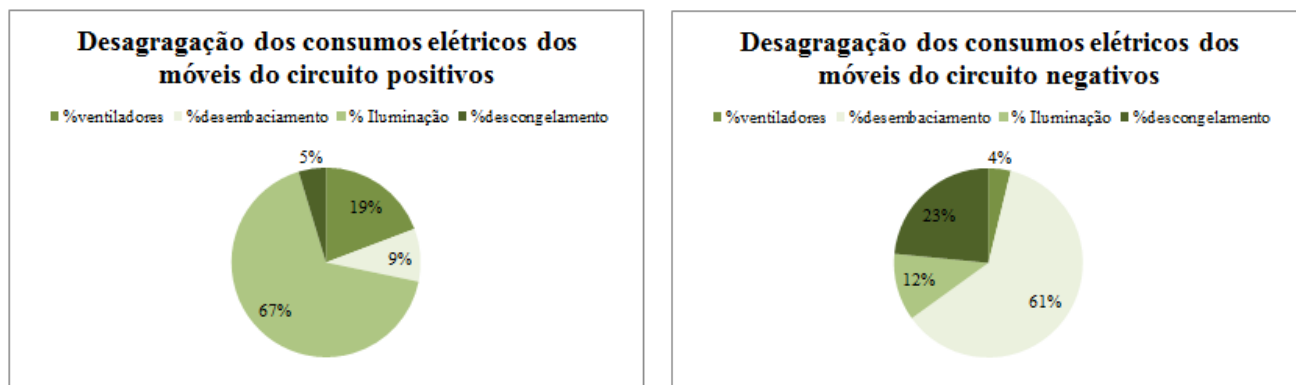


Figura 32 - Desagregação dos consumos elétricos anuais dos móveis obtidos para os dois circuitos no caso A.

A Figura 33 representa a desagregação dos consumos elétricos das câmaras do circuito de positivos e negativos. No primeiro caso os ventiladores, por si só, representam 50% do consumo total, enquanto para as câmaras do circuito de negativos é o descongelamento que predomina.

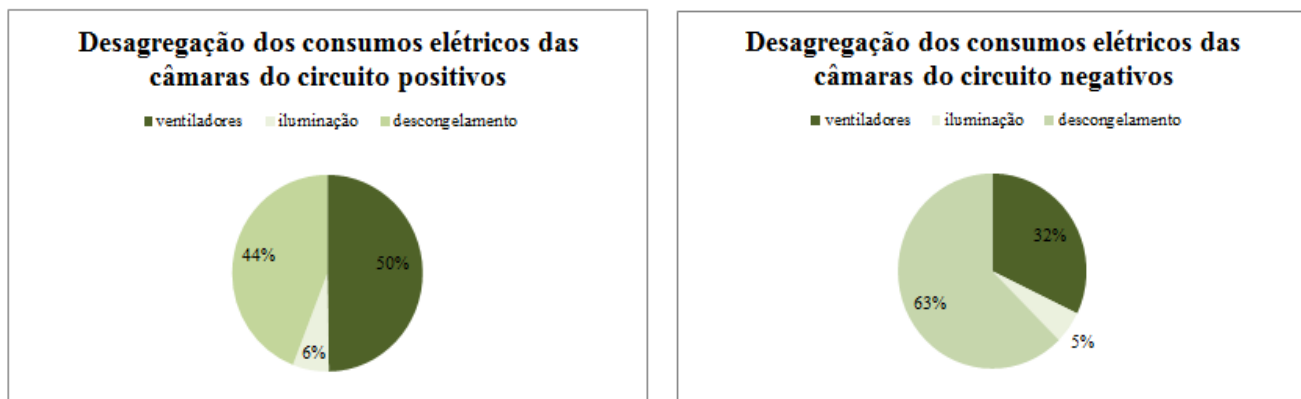


Figura 33 - Desagregação dos consumos elétricos anuais das câmaras obtidos para os dois circuitos no caso A.

Para as **necessidades**:

A Figura 34 representa a desagregação das necessidades térmicas anuais por circuitos. Como se pode verificar, a central de positivos exige mais potência que a central de negativos.

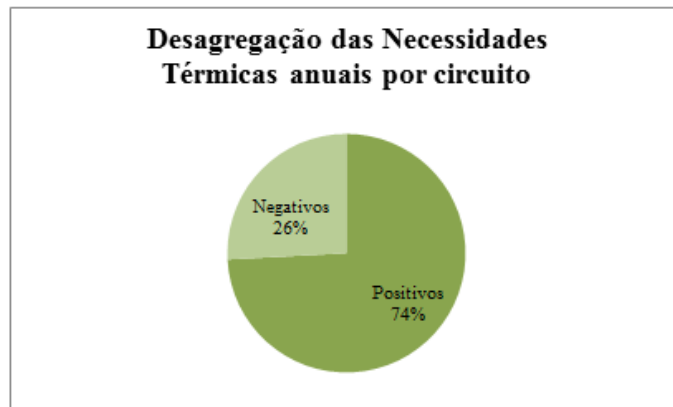


Figura 34 - Percentagem das necessidades térmicas anuais obtidos no caso A.

A Figura 35 representa a desagregação dos ganhos nos móveis no circuito de positivos, onde se observa que os ganhos provenientes do espaço têm grande influência na carga térmica.

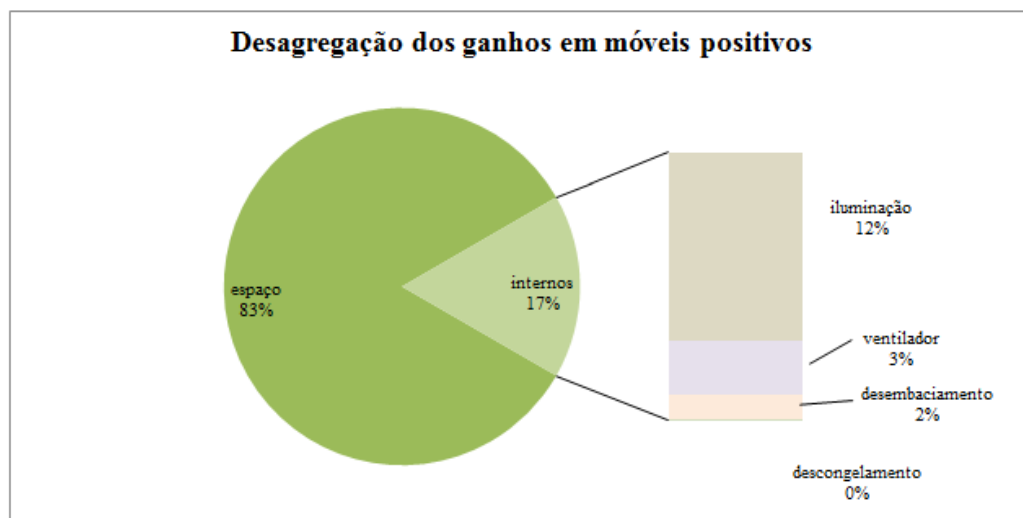


Figura 35 - Desagregação dos ganhos nos móveis do circuito positivo obtidos para o caso A.

Para os móveis negativos, contrariamente ao que acontece no circuito de positivos, é possível constatar (através da Figura 36) que os ganhos internos são o fator que mais contribui para a carga térmica.

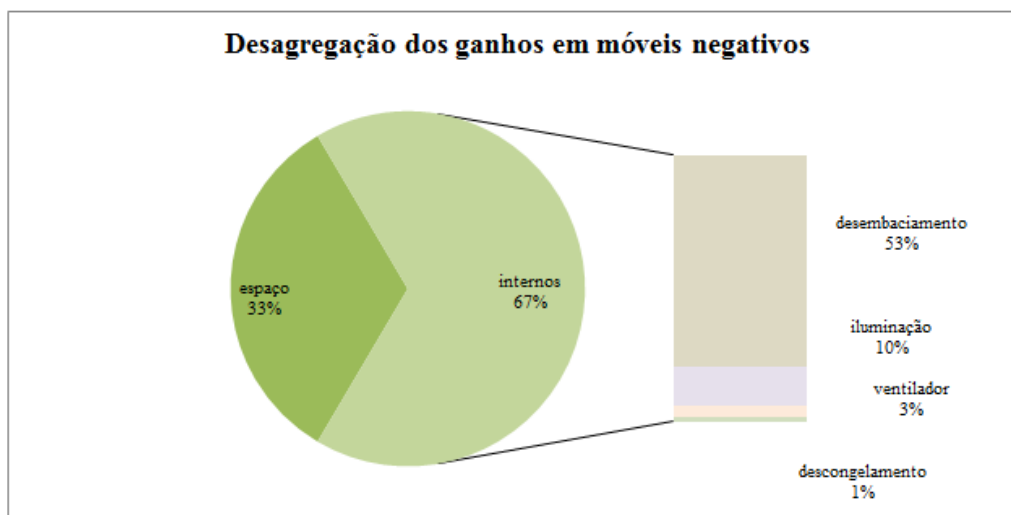


Figura 36 - Desagregação dos ganhos nos móveis do circuito negativo obtidos para o caso A.

Na Figura 37 pode-se verificar uma redução do pico da carga térmica de 4 % de um dia de verão para um dia de inverno. Como referido ao longo do trabalho, a temperatura do interior da loja influencia a carga térmica dos móveis. Tal como seria expectável, no período noturno a carga térmica é inferior, pois não há ganhos internos devido à iluminação e ocupação e, além disso, a temperatura exterior, em geral, também é inferior.

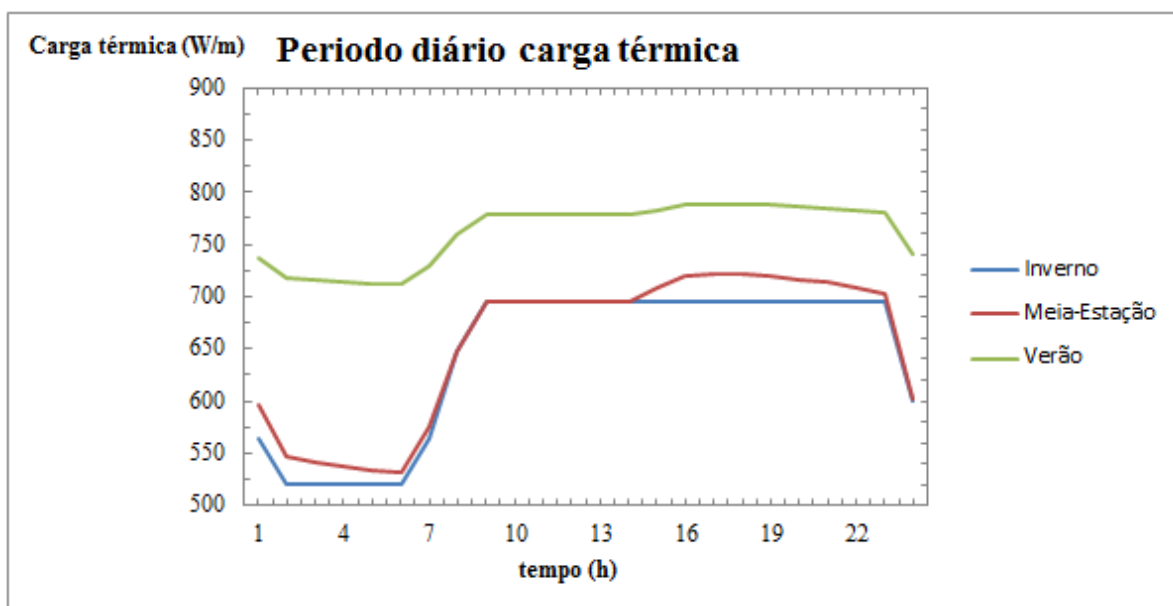


Figura 37 - Evolução diária da carga térmica de um móvel nas várias estações do ano para o caso A.

### 5.1.2 Análise de Resultados

Como esperado para este caso, o *benchmarking* foi superior a 1. Tal é explicado pelo facto do supermercado em análise não possuir boas práticas de gestão energética. Além disso é possível constatar que os equipamentos usados nesta loja não são os que garantem uma máxima eficiência. Algumas medidas de melhoramento, bem como a percentagem de redução no consumo serão descritas no subcapítulo a seguir.

Relativamente aos consumos elétricos anuais, verifica-se que nos positivos são os compressores que mais consomem, enquanto no circuito de negativos são os móveis os

maiores consumidores. Isto deve-se ao facto de nos móveis negativos o desembaciamento estar 24 horas ligado, o que não acontece nos móveis positivos (não possuem portas), bem como da necessidade de descongelamentos diários. Outra explicação para o sucedido é devido às necessidades térmicas exigidas por cada circuito, onde nos positivos se verifica uma solicitação da potência frigorífica aos compressores três vezes maior que no circuito de negativos. Assim sendo, o *rack* de compressores de positivos tem uma potência instalada superior à do circuito de negativos. No entanto, a diferença no consumo elétrico é atenuada, pois o COP da instalação de positivos, devido à temperatura de evaporação ser mais alta, é superior ao COP da instalação de negativos. Coeficiente este que, apesar de ser exigido aos compressores do circuito de positivos uma potência frigorífica três vezes superior aos do circuito de negativos, o consumo elétrico dos primeiros não chega a ser duas vezes superior ao consumo dos compressores do circuito de negativos.

De notar também, a pouca influência dos condensadores no consumo elétrico quando comparados com os restantes equipamentos, devido à elevada eficiência que possuem, bem como a pouca influência das câmaras, visto que os móveis para além de serem em maior número, ainda apresentam um maior número de horas de funcionamento. Por exemplo, a iluminação dos móveis encontra-se sempre ligada no período de abertura ao público, ao contrário do que acontece nas câmaras, que apenas tem a iluminação ligada durante os períodos em que alguém se encontra a operar nelas.

Analisando o caso particular dos móveis, no circuito de positivos, a iluminação é o sistema que mais consome, seguido da ventilação. A explicação reside no facto de nos móveis, apesar de os ventiladores estarem 24 horas por dia em funcionamento, estes são de baixo consumo. Em contrapartida a iluminação é do tipo fluorescente, traduzindo-se, devido à potência debitada por este tipo de iluminação, numa parcela de consumo considerável, apesar de estar um menor tempo em funcionamento. É de realçar que, não tendo estes equipamentos portas nem a maioria necessitar de descongelamento (apenas as vitrinas o exigem), os equipamentos que mais influenciam os ganhos internos não são usados e por isso é normal a iluminação ser o sistema dominante. Por outro lado, os móveis negativos estão equipados com portas e necessitam de descongelamento frequente. Desta forma, os ganhos que predominam e, consequentemente, mais consomem são o desembaciamento e o descongelamento. As resistências de descongelamento apesar de exigirem mais potência que as de desembaciamento, apenas são ligadas duas horas por dia, levando a um consumo elétrico anual menor.

Nas câmaras frigoríficas verifica-se um consumo predominante dos ventiladores, uma vez que estes estão ligados 24 horas por dia, ao contrário dos restantes equipamentos, que estão em funcionamento um número reduzido de horas. Nas câmaras de congelados, onde são exigidas resistências de descongelamento com mais potência, estas destacam-se no consumo.

Relativamente às necessidades térmicas anuais, era expectável que fossem maiores no circuito de positivos, uma vez que a dimensão da rede e o volume das câmaras é bastante superior à dos circuitos negativos. Outro dos fatores que também tem influência nas necessidades térmicas anuais é a existência ou não de portas nos móveis. Como se sabe, os móveis positivos, contrariamente ao que se verifica nos negativos, não possuem portas. Por essa razão, a carga térmica a remover neste caso é maior e, consequentemente, as necessidades também serão maiores. Esta razão, explica também o porquê da enorme diferença dos ganhos externos quando comparados os móveis dos dois circuitos, em que nos móveis positivos a carga removida ao espaço representa 83% da carga térmica total, enquanto que nos móveis negativos representa apenas 33%. Estes valores são muito aceitáveis quando comparados com a literatura.

### 5.1.3 Medidas de melhoramento

Medidas de melhoramento, como inclusão de portas nos móveis positivos, controlos de velocidade nos compressores, controlo das resistências de desembaciamento e de descongelamento, controlo da temperatura de evaporação e condensação, alteração da iluminação, entre outros, poderiam ser feitas nesta loja. Neste trabalho, apenas se analisará a diferença nos consumos elétricos anuais no caso de se usar o controlo flutuante da temperatura de condensação e se a iluminação for do tipo tubular LED.

Assim sendo, na Tabela 16, apresentam-se os consumos elétricos e as necessidades térmicas anuais expectáveis, bem como a respetiva redução, no caso de se proceder às melhorias.

Tabela 16 - Resultados obtidos das medidas de melhoramento do caso A

Circuito	Positivos	Negativos
Necessidades Térmicas anuais (MWh/ano)	749	262
Consumo elétrico anual (MWh/ano)	321	341
Redução Consumo elétrico anual (%)	17 %	8 %

Nas Tabelas 17 e 18 apresentam-se a os consumos elétricos e as necessidades térmicas anuais desagregados nos vários equipamentos, respetivamente.

Tabela 17 - Consumos elétricos obtidos com as medidas de melhoramento do caso A

Consumos Elétricos Anuais (MWh/ano)		
Circuito	Positivos	Negativos
Compressores	233,0	142,2
Condensador	7,7	3,2
Móveis	53	188,6
Câmaras	27,5	7,2

Tabela 18 - Necessidades térmicas anuais obtidas com as medidas de melhoramento do caso A

Necessidades Térmicas Anuais (MWh/ano)		
Circuito	Positivos	Negativos
Móveis	506	219
Câmaras	243	41

Aplicando as duas melhorias, verifica-se uma redução do consumo elétrico anual de 17% no circuito de positivos e de 8% no circuito de negativos. A maior redução ocorre nos móveis, uma vez que a iluminação está muitas vezes ligada. É de notar que nas câmaras não ocorre variação, pois no modelo assumiu-se que a iluminação nas câmaras seria sempre do tipo tubular fluorescente.

## 5.2 Caso B

Os dados disponíveis sobre a loja, situada no norte do país, encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Dados da loja situada no norte do país

Circuito	Positivos	Negativos
Dimensão (metros lineares)	75,9	32
Tipo iluminação móveis	LED	Desligada
Ventiladores móveis	Baixo Consumo	Baixo Consumo
Cortinas Noturnas	Possui	Possui
Tipo de compressor	Pistão	Pistão
Controlo Temperatura Condensação	Flutuante	Flutuante
Consumo real (MWh/ano)	363	207

Uma vez que não foi disponibilizada a planta da loja, o cálculo dos volumes das câmaras foi estimado recorrendo à correlação criada, como referido no capítulo 4. Os restantes dados foram obtidos por medições no local.

No cálculo dos consumos espectáveis e das necessidades, a classe climática utilizada foi a classe *peak shaving*, de modo a tornar os resultados o mais realistas possível. É de salientar que esta loja tem muitos cuidados de eficiência energética, como se pode observar na Tabela 19, isto é, iluminação desligada ou do tipo LED, ventiladores de baixo consumo, uso de cortinas nos móveis sem porta e controlo da temperatura de condensação flutuante.

### 5.2.1 Resultados

Na Tabela 20 apresentam-se os vários resultados obtidos pelo modelo desenvolvido.

Tabela 20 - Resultados obtidos no caso B

Circuito	Positivos	Negativos
Necessidades Térmicas anuais (MWh/ano)	810	220
Consumo elétrico anual (MWh/ano)	331,8	266,7
<i>Benchmarking</i>	1,09	0,78

De igual modo ao caso anterior, é interessante conhecer a desagregação dos vários consumos. As Tabelas 21 e 22 mostram os resultados dos consumos elétricos e das necessidades obtidas pelo modelo, respetivamente.

Tabela 21 - Consumos elétricos obtidos o caso B

Consumos Elétricos Anuais (MWh/ano)		
Circuito	Positivos	Negativos
Compressores	256,8	122,2
Condensador	8,4	2,7
Móveis	45,3	135,9
Câmaras	21,3	5,7

Tabela 22 - Necessidades térmicas anuais obtidas no caso B

Necessidades Térmicas Anuais (MWh/ano)		
Circuito	Positivos	Negativos
Móveis	622	186
Câmaras	188	33

É também importante conhecer a contribuição de cada equipamento, em termos percentuais, para uma caracterização mais completa da instalação.

Para os **consumos elétricos - Targets**:

A Figura 38 representa a desagregação dos consumos elétricos anuais por circuitos, onde se verifica que a central de positivos consome mais que a central de negativos.

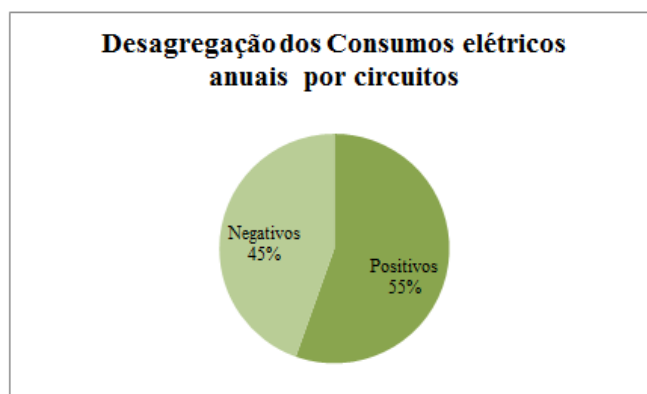


Figura 38 - Percentagem dos consumos elétricos anuais obtidos no caso B.

A Figura 39 representa a desagregação dos consumos elétricos do circuito de positivos e negativos. Verifica-se que, no circuito de positivos, os equipamentos que mais consomem são os compressores, ao contrário do circuito de negativos, onde são os móveis que predominam.



Figura 39 - Desagregação dos consumos elétricos anuais obtidos para os dois circuitos no caso B.

A Figura 40 representa a desagregação dos consumos elétricos dos móveis do circuito de positivos e negativos. No circuito de positivos a iluminação é o sistema que mais consome, ao inverso do circuito de negativos, onde as resistências de desembaciamento se destacam.

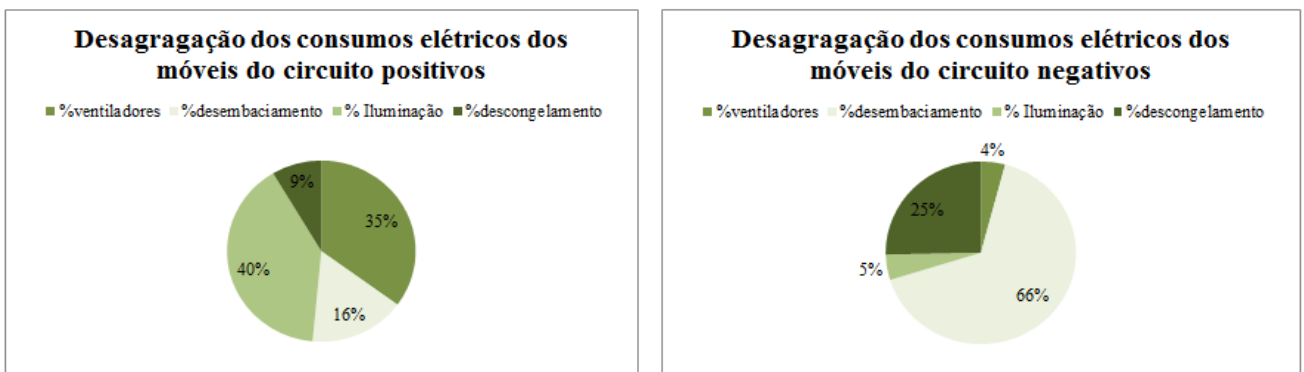


Figura 40 - Desagregação dos consumos elétricos anuais dos móveis obtidos para os dois circuitos no caso B.

A Figura 41 representa a desagregação dos consumos elétricos das câmaras do circuito de positivos e negativos, respetivamente. No primeiro caso são os ventiladores que mais consomem, o que não se verifica no segundo, onde o descongelamento domina.

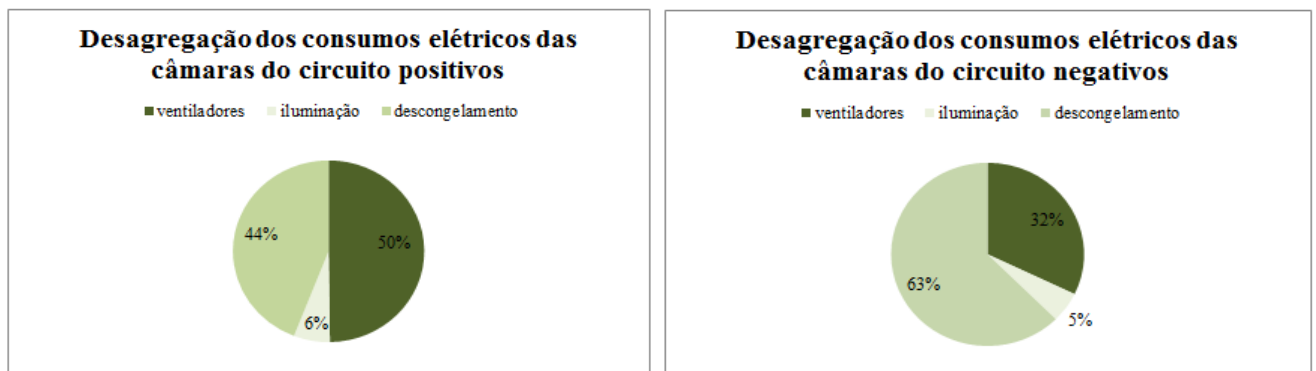


Figura 41 - Desagregação dos consumos elétricos anuais das câmaras obtidos para os dois circuitos no caso B.



Para as **necessidades**:

A Figura 42 representa a desagregação das necessidades térmicas anuais por circuitos. Verifica-se que a central de positivos exige mais potência que a central de negativos.

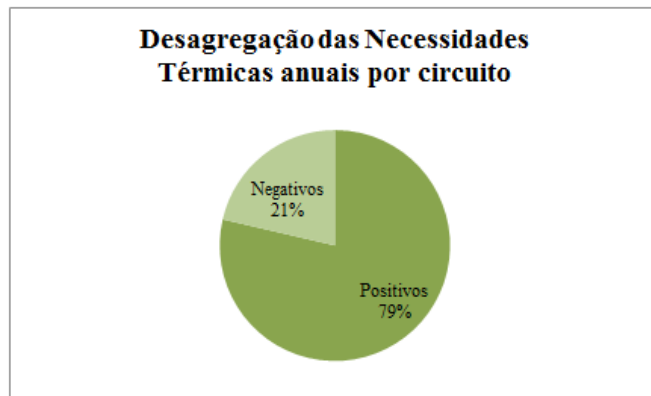


Figura 42 - Percentagem das necessidades térmicas anuais obtidos no caso B.

A Figura 43 representa a desagregação dos ganhos nos móveis no circuito de positivos, onde se observa que os ganhos provenientes do espaço têm grande influência na carga térmica.

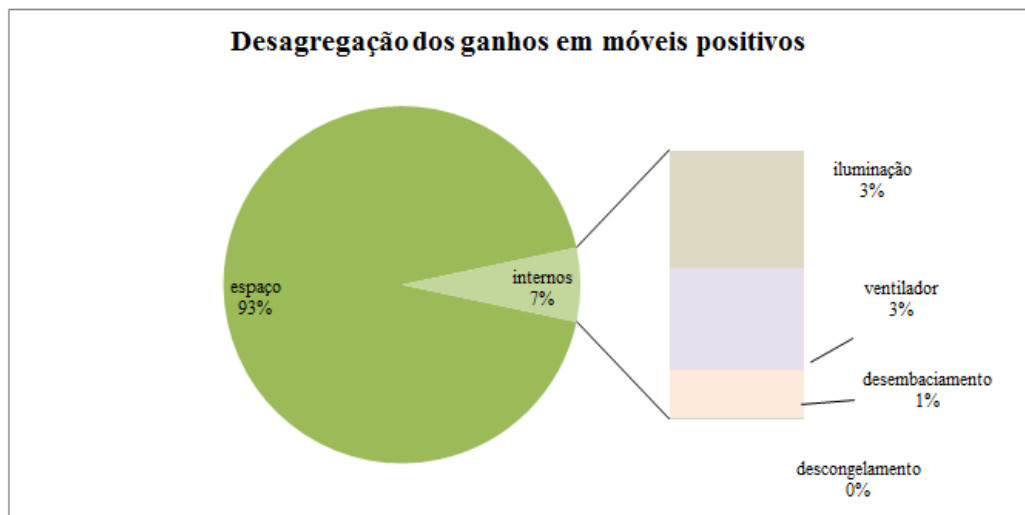


Figura 43 - Desagregação dos ganhos nos móveis do circuito positivo obtidos para o caso B.

A Figura 44 representa a desagregação dos ganhos nos móveis no circuito de negativos, onde, ao contrário do que acontece no circuito de positivos, os ganhos internos têm uma maior contribuição na carga térmica.

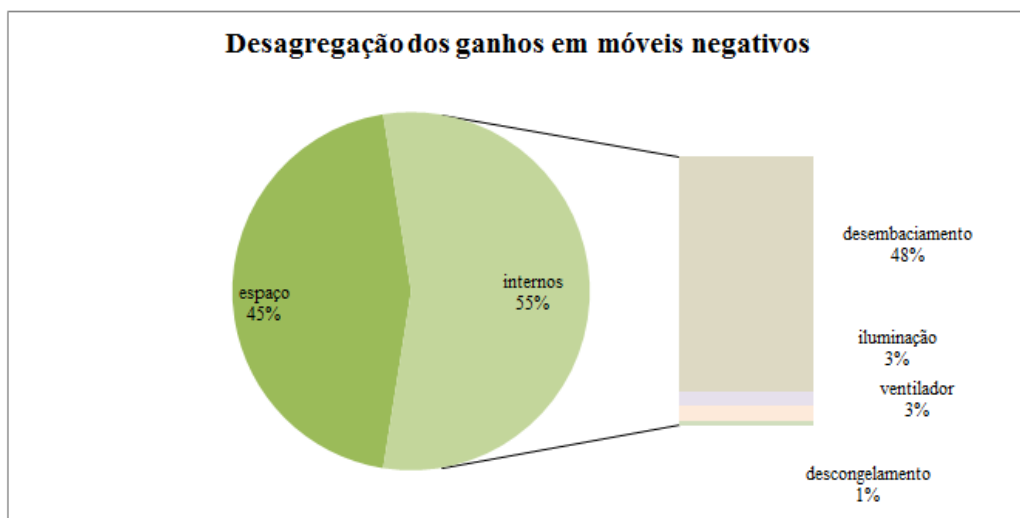


Figura 44 - Desagregação dos ganhos nos móveis do circuito negativo obtidos para o caso B.

Tal como foi referido ao longo do trabalho, a temperatura interior da loja tem uma grande influência na carga térmica dos móveis. A Figura 45 confirma tal facto, já que se pode verificar uma redução do pico da carga térmica de 15% de um dia de verão para um dia de inverno.

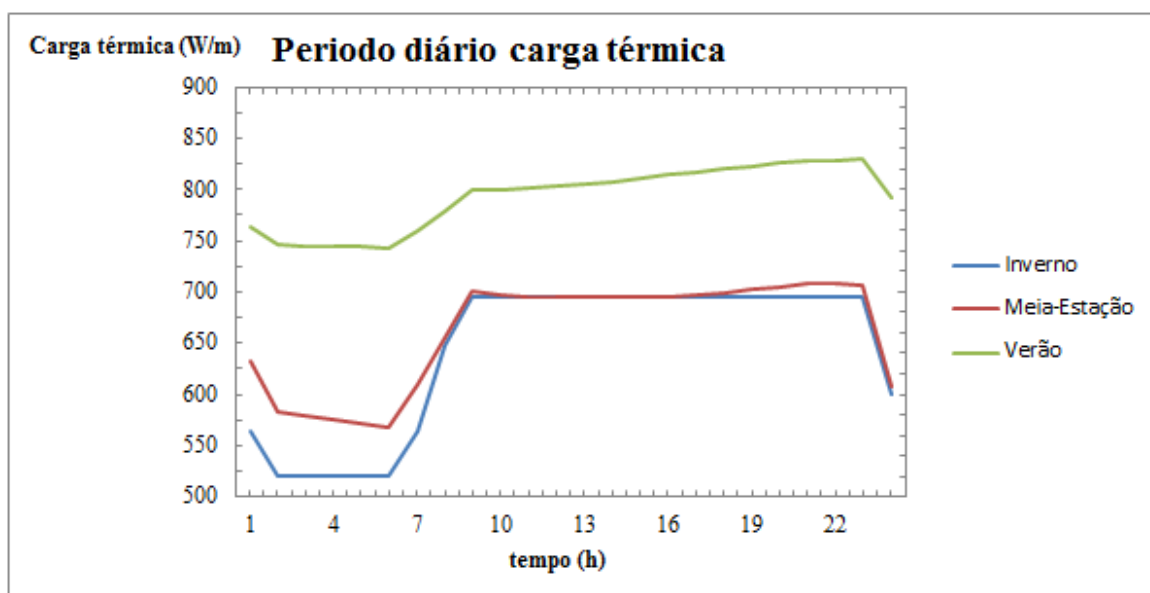


Figura 45 - Evolução diária da carga térmica de um móvel nas várias estações do ano para o caso B.

### 5.2.2 Análise de Resultados

Como esperado para esta loja, o *benchmarking* foi inferior a 1 no circuito de negativos. Tal acontece pois, na realidade, a iluminação dos móveis está desligada e no modelo de cálculo definiu-se iluminação do tipo LED. Uma vez que esta componente ainda é significativa na contribuição para o consumo, o facto de a considerar no modelo leva a esta grande discrepância. No circuito de positivos o valor do *benchmarking* foi próximo de 1, revelando uma boa gestão energética da superfície, estando o supermercado em estudo próximo das considerações assumidas no modelo. Sugere-se ainda, a colocação de portas nos móveis, ou

controlo de velocidade nos compressores como algumas medidas de melhoramento a implementar para reduzir o consumo elétrico.

No que toca aos consumos elétricos anuais, repete-se o cenário do caso A, ou seja, os compressores são os maiores consumidores no circuito de positivos e os móveis no circuito de negativos. As razões do caso anterior são as mesmas para explicar tal facto. É de notar que em ambos os circuitos, os móveis possuem um consumo menor devido à iluminação ser do tipo LED, o que não acontecia no caso anterior.

É de salientar que as temperaturas exteriores verificadas ao longo do ano para o norte e o centro de país foram muito semelhantes e, por essa razão, o valor do COP obtido para os dois casos foi também muito idêntico.

Da mesma forma que no supermercado no centro do país, nos móveis positivos, a iluminação é o sistema que mais consome, seguido da ventilação, pelas mesmas razões descritas no caso A. De uma forma análoga, nos móveis negativos, são as resistências de desembaciamento o elemento mais consumidor. A diferença está que, para este caso, a iluminação decresceu significativamente devido ao uso de LED's. É de salientar que, na realidade, a iluminação nos móveis negativos está desligada e que no modelo 5% do consumo dos móveis provém da iluminação, uma vez que se considerou LED.

Nas câmaras frigoríficas o consumo elétrico, em termos percentuais, distribui-se da mesma forma que no caso A, uma vez que apenas se alterou o volume das mesmas. No cálculo percentual, tal alteração não influencia, já que, com a exceção do volume, todos os parâmetros se mantiveram constantes. Assim, na divisão, os volumes anulam-se mantendo sempre a mesma proporção na desagregação. Este raciocínio é demonstrado pela equação 5.1.

$$\begin{aligned} \% \text{ ventilação positivos} &= \frac{\sum \text{potências ventiladores câmaras}}{\text{Energia elétrica total câmaras positivos}} \\ &= \frac{\dot{W}_{vc1} \times c_{c1} + \dot{W}_{vc2} \times c_{c2} + \dot{W}_{vc3} \times c_{c3}}{\dot{W}_{vc1} \times c_{c1} + \dot{W}_{ic1} \times c_{c1} + \dot{W}_{dc1} \times c_{c1} + \dot{W}_{vc2} \times c_{c2} + \dot{W}_{ic2} \times c_{c2} + \dot{W}_{dc2} \times c_{c2} + \dot{W}_{vc3} \times c_{c3} + \dot{W}_{ic3} \times c_{c3} + \dot{W}_{dc3} \times c_{c3}} \\ &= \end{aligned}$$

Como descrito na Tabela 6, definiram-se percentagens do volume total para os diferentes tipos de câmaras. Assim:

$$= \frac{\dot{W}_{vm1} \times 0,43 \times \epsilon_F + \dot{W}_{vc2} \times 0,32 \times \epsilon_F + \dot{W}_{vc3} \times 0,25 \times \epsilon_F}{\dot{W}_{vc1} \times 0,43 \times \epsilon_F + \dot{W}_{ic1} \times 0,43 \times \epsilon_F + \dot{W}_{dc1} \times 0,43 \times \epsilon_F + \dot{W}_{vc2} \times 0,32 \times \epsilon_F + \dot{W}_{ic2} \times 0,32 \times \epsilon_F + \dot{W}_{dc2} \times 0,32 \times \epsilon_F + \dot{W}_{vc3} \times 0,25 \times \epsilon_F + \dot{W}_{ic3} \times 0,25 \times \epsilon_F + \dot{W}_{dc3} \times 0,25 \times \epsilon_F} \quad (5.1)$$

Onde:

$\dot{W}_{vc1}$ , é a potência do ventilador por unidade de volume da câmara 1

$c_{c1}$ , é o volume do tipo de câmara 1

$\dot{W}_{vc2}$ , é a potência do ventilador por unidade de volume da câmara 2

$c_{c2}$ , é o volume do tipo de câmara 2

$\dot{W}_{vc3}$  é a potência do ventilador por unidade de volume da câmara 3

$c_{c3}$  é o volume do tipo de câmara 3

$\dot{W}_{ic1}$  é a potência da iluminação por unidade de volume da câmara 1

$\dot{W}_{dc1}$  é a potência das resistências de descongelamento por unidade de volume da câmara 1

$\dot{W}_{ic2}$  é a potência da iluminação por unidade de volume da câmara 2

$\dot{W}_{dc2}$  é a potência das resistências de descongelamento por unidade de volume da câmara 2

$\dot{W}_{ic3}$  é a potência da iluminação por unidade de volume da câmara 3

$\dot{W}_{dc3}$  é a potência das resistências de descongelamento por unidade de volume da câmara 3 ,e,  
 $c_t$  é o volume total das câmaras do circuito de positivos.

Como as potências por unidade de volume são sempre constantes, a percentagem é sempre constante.

No que diz respeito às necessidades térmicas anuais, pelos mesmos motivos descritos no caso anterior, era de prever que fossem maiores no circuito de positivos. Mais uma vez, recorrendo à justificação do uso de LED's, em termos percentuais, a carga removida ao espaço é maior neste caso, devido à percentagem de ganhos internos diminuir.

A diferença de temperaturas nas duas lojas e consequentemente a carga térmica total diária é irrelevante, já que as temperaturas não apresentam grandes diferenças entre as regiões analisadas. No verão, a carga térmica no segundo caso é maior, já que o dia foi mais quente no norte do país. Ao invés do que acontece no inverno e na meia-estação, onde a carga térmica foi maior no centro do país, como era de prever, uma vez que as temperaturas são mais quentes nesta região.

## 6 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Os sistemas de refrigeração associados à conservação de alimentos são a principal utilização de energia de um supermercado ou hipermercado. De modo a tentar avaliar o desempenho de várias lojas pretendeu-se, com este trabalho, criar um indicador (*benchmarking*), que seja claro e capaz de fornecer informação sobre o consumo energético do sistema de frio de um supermercado, e desta forma permitir uma correta hierarquização da eficiência energética destes sistemas em diferentes supermercados. A solução passou pela realização de um modelo de cálculo que permite ao utilizador inserir várias características de um supermercado em análise e obter os vários consumos elétricos desagregados do sistema de frio, verificando qual ou quais os componentes mais consumidores, bem como, quais as necessidades térmicas exigidas por cada circuito.

Foi possível verificar que num supermercado com poucas medidas de eficiência energética, o indicador é superior a um, o que revela, que podem ser aplicadas medidas de melhoramento para reduzir os consumos. Para o caso A, verificou-se que, mesmo quando aplicadas poucas medidas, (substituição de lâmpadas fluorescentes por LED's e inclusão do controlo de temperatura de condensação flutuante) o consumo elétrico anual reduziu 17% no circuito de positivos e 8% no circuito de negativos, sendo que a principal redução de consumo ocorre nos móveis.

Nos dois casos de estudo, constatou-se também, que no circuito de positivos, o maior consumidor de energia é o *rack* de compressores e, no circuito de negativos são os móveis. Nestes, a iluminação destaca-se como maior consumidor no circuito de positivos e as resistências de desembaciamento no circuito de negativos, pelo facto de estarem um grande número de horas ativos. Nas câmaras os ventiladores predominam no circuito de positivos, enquanto as resistências de descongelamento são quem mais consome no circuito de negativos.

No que toca às necessidades térmicas verificou-se, pela análise dos dois casos de estudo, que o circuito positivo exige mais potência frigorífica, uma vez que a dimensão da rede e o volume das câmaras é bastante superior à dos circuitos negativos e neste, os móveis contêm portas, o que reduz significativamente a carga removida ao espaço. Comprovou-se também que a temperatura da loja influencia bastante a carga térmica total, como se viu quando comparadas cargas no mesmo tipo de móvel em estações do ano diferentes.

O modelo desenvolvido permitiu, de uma forma fácil, calcular quais os consumos estimados para cada supermercado. A compilação da informação no programa cumpre assim o seu principal objetivo. Em geral, conclui-se que o modelo de cálculo desenvolvido é uma boa aproximação aos casos reais, uma vez que os resultados obtidos vão ao encontro do previsto.

Como trabalhos futuros sugere-se a inclusão de:

- Uma opção para o utilizador selecionar se os móveis contêm portas ou não, ou que tipo de móveis pretende incluir no cálculo;
- Uma opção para o utilizador selecionar o tipo de descongelamento nos móveis;

- Uma opção para se definir os tipos de ventiladores, iluminação e descongelamento nas câmaras;
- Controlo da temperatura de evaporação;
- Controlo de velocidade nos compressores.

Com esta dissertação foi também possível constatar-se que, apenas com a dimensão da rede (metros lineares) é muito difícil estimar o consumo do sistema de frio de um supermercado, uma vez que os consumos podem ter grandes variações dependendo fortemente de outras variáveis, principalmente o tipo de móveis usados.

## Referências

- Afonso, C. (2008). Termodinâmica Aplicada. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP-DEMEGI.
- ASHRAE (2014). ASHRAE HANDBOOK- REFRIGERATION, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Borgstein, E. (2014) "Desenvolvimento de benchmarks nacionais de consumo energético de edificações em operação." 1-15.
- Castro, P. J. d. (2010). Refrigeração UNIVASF.
- CBCS. (7 de Abril de 2015). from [http://www.cbcs.org.br/\\_5dotSystem/userFiles/CTEnergia-benchmark/CBCS\\_Benchmarking\\_objetivos.pdf](http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/CTEnergia-benchmark/CBCS_Benchmarking_objetivos.pdf).
- Consultores, E. S. (2015). Retrieved 10 de Junho de 2015, from <http://www.edificiosaudaveis.pt/pt.php#/homepage>.
- Danfoss Controles Automáticos para Sistemas de Refrigeração Industrial. DIVISÃO DE REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO: 41-45.
- Danfoss (2005). Thermostatic expansion valves. REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING. Danfoss A/S (RC-CMS/MWA).
- Danfoss (2012). Energia- Indústria de alimentos e bebidas de olho na eficiência energética EnVisioneering Solutions. **17**: 15,16,17.
- frilider (2015) "EFICIÊNCIA ENERGÉTICA."
- Goetzler, W., S. Goffri, S. Jasinski, R. Legett, H. Lisle, A. Marantan, M. Millard, D. Pinault, D. Westphalen and R. Zogg (2009). Energy Savings Potential and R&D Opportunities for Commercial Refrigeration, U.S. Department of Energy.
- IAPMEI. "Benchmarking e Boas Práticas." Retrieved 7 de Abril, from <http://www.iapmei.pt/iapmei-bmkartigo-01.php?temaid=14>.
- INDUSTRIES, C. (2011). Supermercado EUROSPAR “excelente”. Success Story.
- Junior, A. B. and C. C. M. U. Pasa (2010) "APLICAÇÃO DO MÉTODO GRAUS-DIA PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES UNIFAMILIARES." 2.
- Lopes, R. (2012). ebm-papst.
- Loureiro, J. M. d. S. (2013). BENCHMARKING ENTRE OS TRIBUNAIS DA RELAÇÃO PORTUGUESES.
- Ltda, W. I. e. T. d. F. (2012). "Racks de Compressores." Retrieved 15 de Maio de 2015, from <http://www.windustria.com/#!/racks-frigorificos/c1gel>.
- Martinelli, P. L. C. (2011). Refrigeração e Ar-Condicionado : Ciclo de Compressão, Balanço de Energia, Trocadores de Calor, Dispositivos de Expansão. DeTEC.

- Mesquita, N. M. R. (2009). Redução do consumo energético de um equipamento de frio.
- Oliveira, J. A. B. (2012). Estudo de Eficiência Energética na Refrigeração de um Supermercado, Universidade de Aveiro.
- Portilla, G. F. D. (2010). Simulação de Sistemas de Refrigeração em Supermercados, PUC-Rio.
- Rodrigues, Á. H. (2014). Energia Ambiente. FEUP.
- Silva, J. M. B. R. d. (2012). Eficiência Energética em Lojas de Retalho Alimentar: Os Desafios e Possíveis Soluções Em Portugal, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Singh, A. (2005) "Optimum Refrigeration Control with E2." 1-15.
- Technologies, E. C. (2006). "Everything You NEED to KNOW About TXVs." RSES: 16,17,18,19.
- Trane Refrigeration Compressors. Air Conditioning Clinic, The Trane Company— Worldwide Applied Systems Group.
- Trane Refrigeration Cycle. Air Conditioning Clinic, The Trane Company— Worldwide Applied Systems Group.
- Trane Refrigeration System Components. Air Conditioning Clinic, The Trane Company— Worldwide Applied Systems Group.
- Vale, L. C. A. C. (2012). Análise de Indicadores de Desempeho Energético em Centros Comerciais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.



## ANEXO A: Interface do modelo

Neste anexo é representada a interface do modelo. Numa primeira fase é apresentada a folha de *inputs* e *outputs*. Esta permite ao utilizador introduzir os vários dados do supermercado em análise apresentando os vários resultados relativos ao consumo elétrico anual, bem como as necessidades térmicas anuais. Numa segunda fase são apresentadas as restantes folhas correspondentes aos vários cálculos realizados.

### Folha “1\_Sintese”

Como referido em cima, é nesta folha que o utilizador insere os dados da loja e são apresentados os resultados. As células a verde-escuro representam os *inputs*. A verde-claro são as células onde serão apresentados os resultados, *outputs*. Da Figura 46 à 52, são apresentados os *inputs*.

#### 1 Hipermercado

#### 2 Dimensão da rede de frio

Móveis	Metros lineares (total)			m
	Metros lineares (positivos)		(default: 65% do total)	m
	Metros lineares (negativos)		(default: 35% do total)	m
Câmaras	Volume (total)		(default: total ML * 2,6)	m <sup>3</sup>
	Volume(positivos)		(default: 75 % volume do total)	m <sup>3</sup>
	Volume (negativos)		(default: 25 % do total)	m <sup>3</sup>

#### 3 Consumo Medido

Positivos		mWh/ano
Negativos		mWh/ano

#### 4 Operação da loja

Classe Climática	peak Shaving	(default: peah shaving)
------------------	--------------	-------------------------

#### 5 Características dos móveis

Cortina Noturna	Sim	(default: não)
Iluminação	fluorescente	(default: fluorescente)
Ventiladores	baixo consumo	(default: baixo consumo)

Figura 46 - Interface do modelo- *Inputs*.

A Figura 47 mostra como o utilizador, na interface de *inputs*, pode seleccionar a classe climática pretendida.

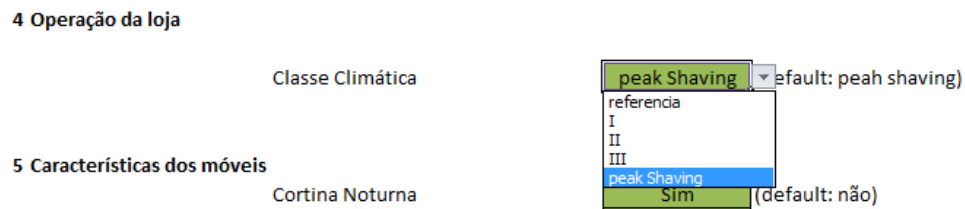


Figura 47 - *Inputs*: Seleção da classe climática.

A Figura 48 exibe como o utilizador, na interface de *inputs*, pode seleccionar se os móveis contêm cortina noturna, ou não.



Figura 48 - *Inputs*: Seleção da cortina noturna.

A Figura 49 mostra como o utilizador, na interface de *inputs*, pode seleccionar o tipo de iluminação contida nos móveis.



Figura 49 - *Inputs*: Seleção da iluminação dos móveis.

A Figura 50 apresenta como o utilizador, na interface de *inputs*, pode seleccionar o tipo de ventiladores contidos nos móveis.

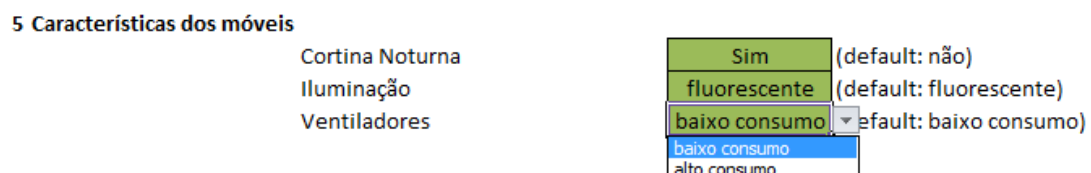


Figura 50 - *Inputs*: Seleção do tipo de ventiladores dos móveis.

A Figura 51 ilustra como o utilizador, na interface de *inputs*, pode seleccionar o controlo da pressão de condensação.

## 6 Características da central

fluído  
controlo Pressão aspiração  
controlo Pressão descarga  
Temperatura condensação

(default: 35 °C)

Figura 51 - *Inputs*: Seleção do tipo de controlo da temperatura de condensação.

A Figura 52 mostra como o utilizador, na interface de *inputs*, pode seleccionar o tipo de compressor a usar. O tipo de compressor a usar pode ser diferente para cada circuito.

compressor negativos  
compressor positivos

Figura 52 - *Inputs*: Seleção do tipo de compressor.

Nas Tabelas 23, 24, 25 e 26 são apresentados os resultados pretendidos, *outputs*. Na Tabela 23 são exibidos os vários resultados relativos às necessidades térmicas, na Tabela 24, os vários consumos elétricos, na Tabela 25 o COP médio anual, bem como o *benchmarking*, e por fim na Tabela 26 a contribuição dos vários equipamentos, em termos percentuais, para o consumo elétrico anual.

Tabela 23 - *Outputs*: Necessidades térmicas

## 8 Necessidades térmicas

		Negativos (MWh/ano)	Positivos (MWh/ano)
Móveis	HCP	0	
	HSP	0	
	C	0	
	VCP	0	
	SV		0
	VCP		0
	VSP		0
	VT		0
	Sub-Total	0	0
Câmaras	cong	0	
	carne, peixes		0
	Outras		0
	lab		0
	Sub-total	0	0
Máquina de gelo		1	
Total		1	0

Tabela 24 - *Outputs*- Consumos elétricos

9 a) Consumos Elétricos		Negativos (MWh/ano)	Positivos (MWh/ano)
Central	Condensador	0,0	0,0
	Compressor	0,0	0,0
	Sub-Total	0,0	0,0
Móveis	HCP	0,0	
	HSP	0,0	
	C	0,0	
	VCP	0,0	
	SV		0,0
	VCP		0,0
	VSP		0,0
	VT		0,0
	Sub-Total	0,0	0,0
Câmaras	cong	0,0	
	carne, peixes		0,0
	Outras		0,0
	lab		0,0
	Sub-Total	0,0	0,0
Máquina de gelo		0,1	
Total		0,1	0,0

Tabela 25 - *Outputs*: COP médio anual e *benchmarking*

## 10 COP

	Negativos	Positivos
Compressor		

## 11 Benchmarking

Negativos	
Positivos	

Tabela 26 - *Outputs*: contribuição dos vários equipamentos para o consumo elétrico anual

## 9 c) Desagregação consumos elétricos (%)

	Negativos	Positivos
Condensadores		
Compressores		
Móveis		
Câmaras		

## Folha “2\_Móveis”

Esta folha representa todo o cálculo relativamente às cargas térmicas de todo o tipo de móveis. Apenas se apresentou dois tipos, uma vez que para os outros o cálculo é idêntico. Como explicado no capítulo 4, calcula-se também o consumo elétrico anual, bem como as necessidades térmicas anuais. Nas Tabelas 27 e 28 apresenta-se o cálculo para móveis do tipo semi-murais e *combis*, respetivamente. Na Tabela 29, mostra-se como se apresentam os resultados para todo o tipo de móveis.

Tabela 27 - Cálculo cargas térmicas horárias semi-murais

semi-murais								
carga térmica (w/m)	ventiladores		desembaciamento (w/m)	iluminação		descongelamento (w/m)	espaço (w/m)	
	Baixo consumo (w/m)	alto consumo (w/m)		T8 (w/m)	LED (w/m)			
509,3525	20	60	0	0	0	0	489,3525	
509,3525	20	60	0	0	0	0	489,3525	
509,3525	20	60	0	0	0	0	489,3525	
509,3525	20	60	0	0	0	0	489,3525	
509,3525	20	60	0	0	0	0	489,3525	
509,3525	20	60	0	0	0	0	489,3525	
509,3525	20	60	0	0	0	0	489,3525	
658,4965	20	60	0	0	0	0	516,4965	
1174,993	20	60	0	122	37	0	1032,993	
1174,993	20	60	0	122	37	0	1032,993	
1174,993	20	60	0	122	37	0	1032,993	
1174,993	20	60	0	122	37	0	1032,993	
1174,993	20	60	0	122	37	0	1032,993	

Tabela 28 - Cálculo cargas térmicas horárias *combis*

combis								
carga térmica (w/m)	ventiladores		desembaciamento (w/m)	iluminação		descongelamento (w/m)	espaço (w/m)	
	baixo consumo (w/m)	alto consumo (w/m)		T5 (w/m)	LED (w/m)			
564,7088	20	50	350	0	0	1500	149,7088	
519,7088	20	50	350	0	0	0	149,7088	
519,7088	20	50	350	0	0	0	149,7088	
519,7088	20	50	350	0	0	0	149,7088	
519,7088	20	50	350	0	0	0	149,7088	
519,7088	20	50	350	0	0	0	149,7088	
564,7088	20	50	350	0	0	1500	149,7088	
648,4912	20	50	350	0	0	0	183,4912	
694,364	20	50	350	95	35	0	229,364	
694,364	20	50	350	95	35	0	229,364	
694,364	20	50	350	95	35	0	229,364	
694,364	20	50	350	95	35	0	229,364	
694,364	20	50	350	95	35	0	229,364	

Tabela 29 - Resultados para os vários tipos de móveis

circuito	tipo de móvel		Energia elétrica (kWh/ano)	Necessidades Térmicas (kWh/ano)
negativos	ilhas	c/porta s/porta	10161 0	11082 0
	combis		193273	223223
	murais c/porta		0	0
positivos	semi-murais		6306	59627
	murais	c/porta s/porta	0 69777	0 463598
	vitruinas		20510	26397

### Folha “3\_Câmaras”

Esta folha representa todo o cálculo relativamente às cargas térmicas de todo o tipo de câmaras. Da mesma forma que nos móveis, apenas se apresentou um tipo, uma vez que para os outros o cálculo é idêntico. Como explicado no capítulo 4, calcula-se também o consumo elétrico anual, bem como as necessidades térmicas anuais. Na Tabela 30 apresenta-se o cálculo para câmaras congeladas. Na Tabela 31, mostra-se como se apresentam os resultados para todo o tipo de câmaras.

Tabela 30 - Cálculo cargas térmicas horárias câmara congelados

Congelados $\Delta T (^{\circ}C) = -22/-24$							
Carga térmica (w/m3)	ventiladores (w/m3)	iluminação (w/m3)	descongelamento (w/m3)	empilhadores (w/m3)	produtos (w/m3)	paredes, teto (w/m3)	infiltrações (renovações por hora + portas) (w/m3)
47	3	0	70	0	30	10	4
47	3	0	0	0	30	10	4
47	3	0	0	0	30	10	4
47	3	0	0	0	30	10	4
47	3	0	0	0	30	10	4
47	3	0	0	0	30	10	4
47	3	0	70	0	30	10	4
47	3	0	0	0	30	10	4
63	3	3	0	3	30	15	9

Tabela 31 - Resultados para os vários tipos de câmaras

circuito	tipo de câmara	$\Delta T (^{\circ}C)$	Energia elétrica (kWh/ano)	Necessidades Térmicas (kWh/ano)
negativos	congelados	-22/-24	7219,408	41124,842
positivos	carnes, peixes	0/2	14482,7182	125573,686
	charcutaria, laticínios, pastelaria, verduras	2/4	9509,856	75191,26144
	laboratórios	10/12	3467,135	42001,864

### Folha “4\_Central”

Esta folha representa todo o cálculo relativamente ao consumo elétrico dos compressores e dos condensadores. Na Tabela 32 estão representadas as temperaturas. Dependendo do controlo da temperatura de condensação selecionado, o COP da instalação e a eficiência do condensador são afetados pela temperatura de condensação constante ou pela temperatura de condensação flutuante. Ambos são calculados através de correlações mostradas no anexo B. É de salientar que a temperatura de condensação, para qualquer um dos tipos de controlo, depende da temperatura exterior. Na Tabela 33, são exibidos os vários consumos elétricos dos equipamentos, bem como as potências térmicas que cada um tem de fornecer para satisfazer as necessidades térmicas. O cálculo de cada consumo foi explicado no capítulo 4.

Tabela 32 - Temperaturas para o cálculo do COP e da eficiência do condensador.

T ext	Tcondensação constante	Tcondensação flut
12,2	29,70	24,2
7,2	23,63	19,2
7,2	26,96	19,2
7,8	25,12	19,8
7,8	23,76	19,8
9	25,71	21
9	25,54	21
9	27,53	21
9,6	29,08	21,6
10,2	23,03	22,2
12	24,74	24
16,8	28,38	28,8

Tabela 33- Cálculo dos vários consumos horários da central

Qct (kWh)		Consumo compressores (kWh)		Qcond (kWh)		E		Qcond,ele (kWh)	
negativos	positivos	Negativos	Positivos	Negativos	Positivos	Neg	Pos	Neg	Pos
28	54	17	18	45	72	210,0	210,0	0,21	0,34
26	53	13	15	38	68	188,3	188,3	0,20	0,36
26	53	14	17	40	70	230,7	230,7	0,17	0,30
26	53	13	15	39	69	207,5	207,5	0,19	0,33
26	53	12	15	38	68	192,1	192,1	0,20	0,35
26	53	13	15	39	69	217,0	217,0	0,18	0,32
28	54	14	15	42	69	216,6	216,6	0,19	0,32
31	70	16	21	47	91	267,5	267,5	0,18	0,34
34	109	20	36	55	145	289,2	289,2	0,19	0,50
34	109	15	27	49	136	172,3	172,3	0,28	0,79
34	107	16	30	50	136	183,0	183,0	0,27	0,74
34	107	19	34	53	141	207,2	207,2	0,26	0,68
34	107	21	37	54	143	221,0	221,0	0,25	0,65
34	107	18	32	51	139	148,1	148,1	0,35	0,94
34	107	19	35	53	141	176,9	176,9	0,30	0,80
34	107	17	31	51	138	139,2	139,2	0,37	0,99
34	107	19	35	53	141	177,8	177,8	0,30	0,80
34	107	19	33	52	140	172,8	172,8	0,30	0,81
34	107	21	37	54	143	214,2	214,2	0,25	0,67
34	109	18	33	52	142	189,3	189,3	0,28	0,75
34	109	18	33	52	142	210,6	210,6	0,25	0,67
34	107	20	36	54	142	241,0	241,0	0,22	0,59
34	107	14	26	48	133	174,7	174,7	0,27	0,76
30	96	13	24	43	120	192,7	192,7	0,22	0,62

Na folha 5, **5\_RFP**, estão discriminados os vários pressupostos usados, como indicados no capítulo 4, e na folha 6, **6\_Clas**se Climática, está representada a Tabela 7.

### Folha “7\_peak shaving”

Nesta folha, o utilizador insere as temperaturas exteriores típicas da localização onde se encontra o supermercado para as 8760 horas do ano, e de acordo com a equação 4.1, calculam-se as temperaturas interiores da loja para as mesmas horas. A Tabela 34 representa esse cálculo.

Tabela 34 - Cálculo temperatura interior da loja- *Peak shaving*

Dia	Hora	Mês	Temperatura exterior Local, ano de referência [°C]	Tinterior loja		
12	14	Jun	33,6	19,5	19,5	19,48
12	15	Jun	33,6	20,2	20,2	20,18
12	16	Jun	24	20,9	20,9	20,85
12	17	Jun	21,6	21,0	21,0	21,01
12	18	Jun	20,4	21,0	21,0	21,04
12	19	Jun	19,2	21,0	21,0	21,01
12	20	Jun	19,2	20,9	20,9	20,92

### Folha “comprimentos”

Nesta folha encontram-se os comprimentos desagregados para o tipo de móveis considerados no modelo, bem como, os volumes desagregados para o tipo de câmaras consideradas no modelo. As Tabelas 35 e 36 representam os vários comprimentos e os vários volumes, respetivamente, obtidos com a percentagem referida no capítulo 4.

Tabela 35 - Comprimentos dos móveis

circuito	tipo de móvel		comprimento (m)
negativos	ilhas	c/porta	4,884
		s/porta	0
	combis		39,516
	muraís c/porta		0
positivos	semi-muraís		7,104
	muraís	c/porta	0
		s/porta	69,264
	vitrinas		12,432

Tabela 36 - Volumes das câmaras

circuito	tipo de camara	volume (m <sup>3</sup> )
negativos	congelados	88,3
positivos	carnes, peixes	116,702
	charcutaria, lacticin	86,848
	laboratórios	67,85

### Folha “fatores”

Nesta folha procede-se ao cálculo dos fatores de correção para o cálculo da carga térmica referente ao espaço caso a temperatura seja diferente da temperatura de referência (25 °C). Os vários fatores foram calculados através de correlações exibidas no anexo B. Na Tabela 37 são representados os fatores respetivos à classe climática de referência e à classe I. Na Tabela 38 encontram-se os fatores relativos à classe climática II e III. Para a classe *peak shaving*, os fatores encontram-se na Tabela 39.



Tabela 37 - Fatores de correção para as classes climáticas de referência e I

referencia I						
Normal	Vertical sem porta	Combis	Normais	Vertical sem portas	Combis	
1	1	1	0,9525	0,86	0,86	
1	1	1	0,9525	0,86	0,86	
1	1	1	0,9525	0,86	0,86	
1	1	1	0,9525	0,86	0,86	
1	1	1	0,9525	0,86	0,86	

Tabela 38 - Fatores de correção para as classes climáticas II e III

Fator correção Temperaturas						
II			III			
Normais	Vertical sem portas	Combis	Normais	Vertical sem portas	Combis	
0,91	0,73	0,74	0,86	0,59	0,61	
0,91	0,73	0,74	0,86	0,59	0,61	
0,91	0,73	0,74	0,86	0,59	0,61	
0,91	0,73	0,74	0,86	0,59	0,61	
0,91	0,73	0,74	0,86	0,59	0,61	

Tabela 39 - Fatores de correção para a classe climática *peak shaving*

Peak		
Normais	Vertical sem portas	Combis
0,84	0,53	0,55
0,84	0,53	0,55
0,84	0,53	0,55
0,84	0,53	0,55
0,84	0,53	0,55



## ANEXO B: Correlações obtidas para a realização do modelo

Neste anexo são exibidas as várias correlações utilizadas no desenvolvimento do modelo. Em primeiro lugar representam-se as correlações para os vários fatores de correção das cargas térmicas dos móveis. De seguida apresentam-se as correlações para o cálculo do COP e por fim a correlação obtida para o cálculo da eficiência do condensador.

### Fatores de correção para as cargas térmicas dependendo da temperatura do interior da loja

As várias correlações foram obtidas recorrendo a catálogos do fabricante mais usados nos supermercados portugueses, *Bonnet Névé*. Nestes, são discriminados para três temperaturas diferentes, três fatores de correção correspondentes. Estes dados permitiram a realização de um gráfico, do qual foi possível obter a respetiva de correlação, recorrendo-se ao método dos mínimos quadrados para a obtenção do ajustamento da função. É de salientar que foram obtidas três correlações diferentes, uma vez que para os móveis do tipo *combi* (Figura 54) e vertical sem portas (Figura 55), os fatores para as correspondentes temperaturas são diferentes dos restantes tipos (Figura 53).

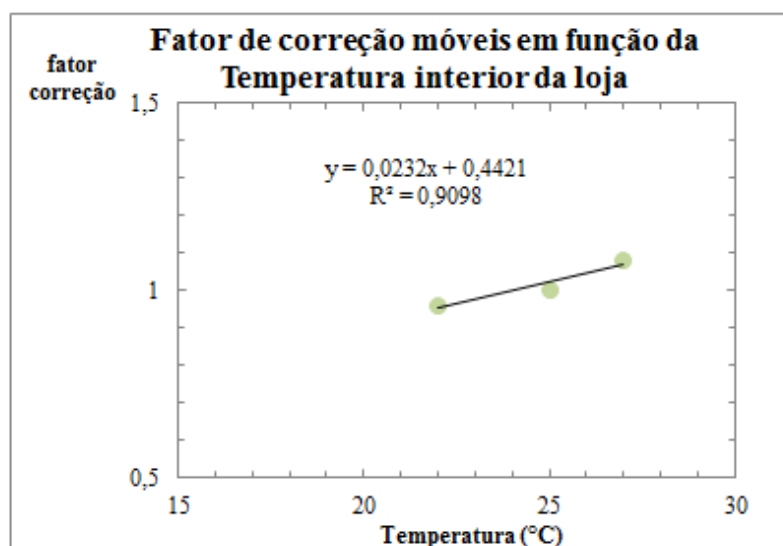


Figura 53 - Fator de correção para os móveis em função da temperatura do interior da loja.

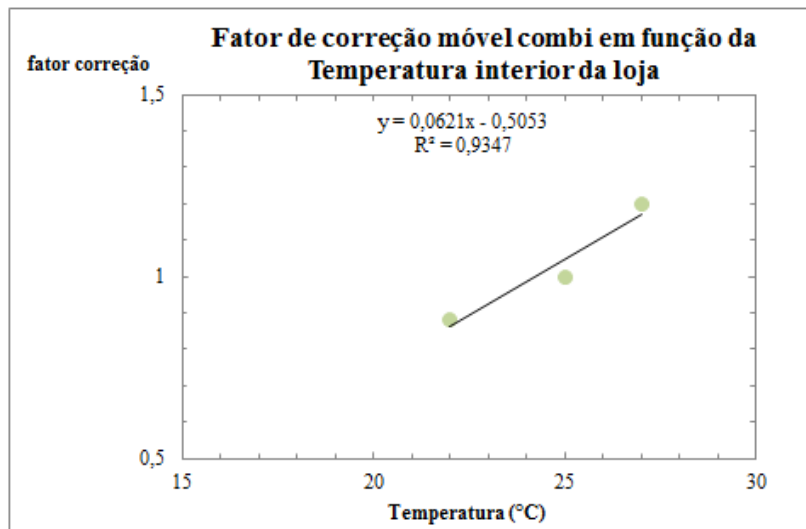


Figura 54 - Fator de correção para os móveis do tipo *combi* em função da temperatura do interior da loja.

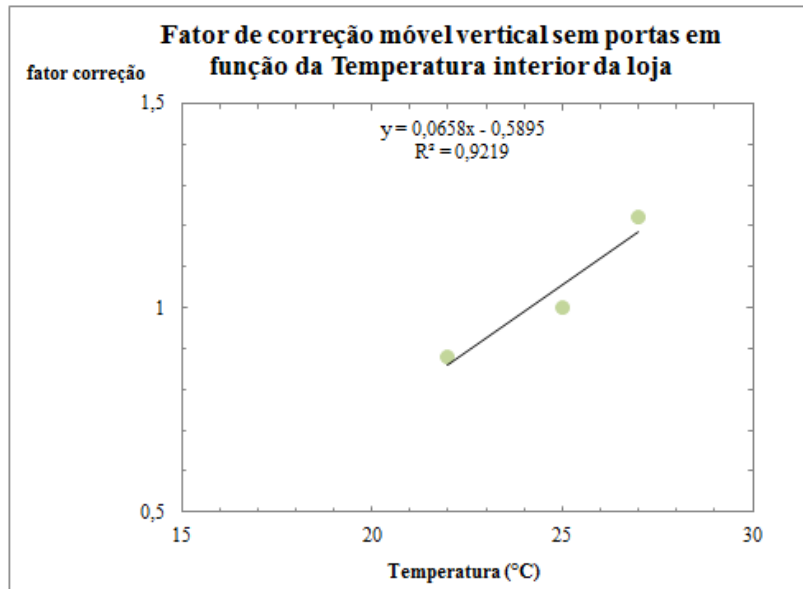


Figura 55 - Fator de correção para os móveis do tipo vertical sem porta em função da temperatura do interior da loja.

### Cálculo do COP

Para o cálculo de COP, foram obtidas quatro correlações de modo a diferenciar o tipo compressor selecionado (parafuso ou pistão) e o tipo de circuito onde este é inserido (positivo ou negativo). Tal é necessário, já que o COP varia consoante o tipo de compressor a usar, bem como, com as temperaturas de evaporação e condensação. Como referido no capítulo 4, na realização deste modelo considerou-se, no circuito de positivos, uma temperatura de evaporação constante e igual a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  e, no de negativos, uma temperatura de evaporação constante e igual a  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . É de salientar que o COP decresce à medida que a temperatura de evaporação decresce.

As correlações foram obtidas utilizando o *software* da “Bitzer”, fabricante mais comum de compressores utilizados em instalações frigoríficas. Selecionando um qualquer modelo de compressor e fixando a temperatura de evaporação, obtém-se vários COP’s correspondentes a determinadas temperaturas de condensação, dos quais se obtiveram as várias correlações. Assim, é possível obter o COP dependendo da temperatura de condensação. É importante referir, que o COP não sofre variações significativas de modelo para modelo. Por exemplo, para um compressor do tipo parafuso, selecionar o modelo HSN5343-20 ou o modelo HSN7471-

70, traduz erros no COP na ordem de 1%, o que faz com que seja perfeitamente aceitável este tipo de correlação. As Figuras 56 e 57 indicam as correlações para o tipo de compressor parafuso para o circuito de positivos e negativos, respectivamente, sendo que as 58 e 59 mostram as correlações para o tipo de compressor pistão para o circuito de positivos e negativos, respectivamente.

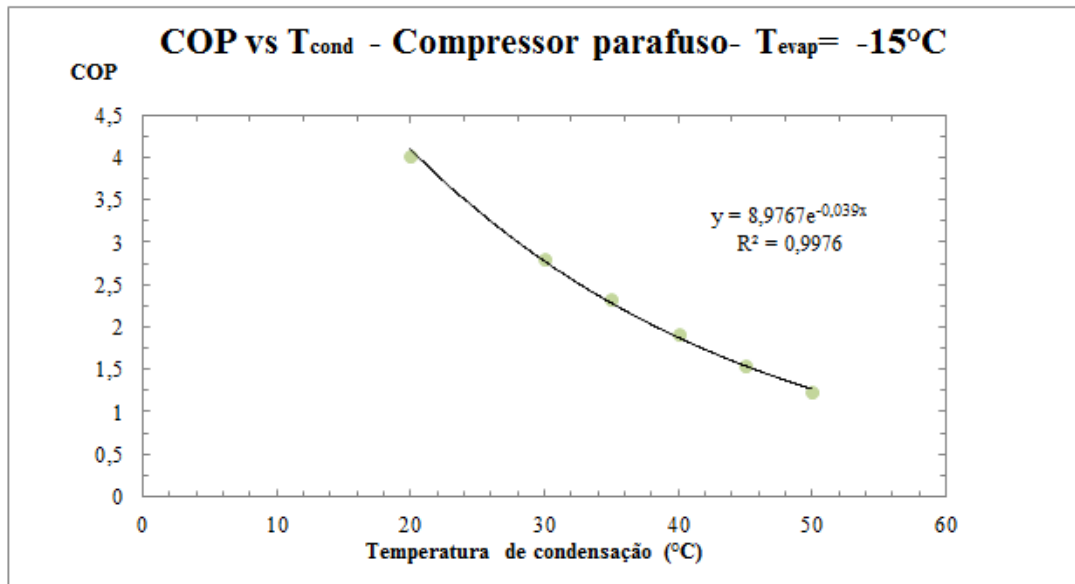


Figura 56 - Correlação obtida para o COP utilizando um compressor do tipo parafuso em função da temperatura de condensação para o circuito de positivos.

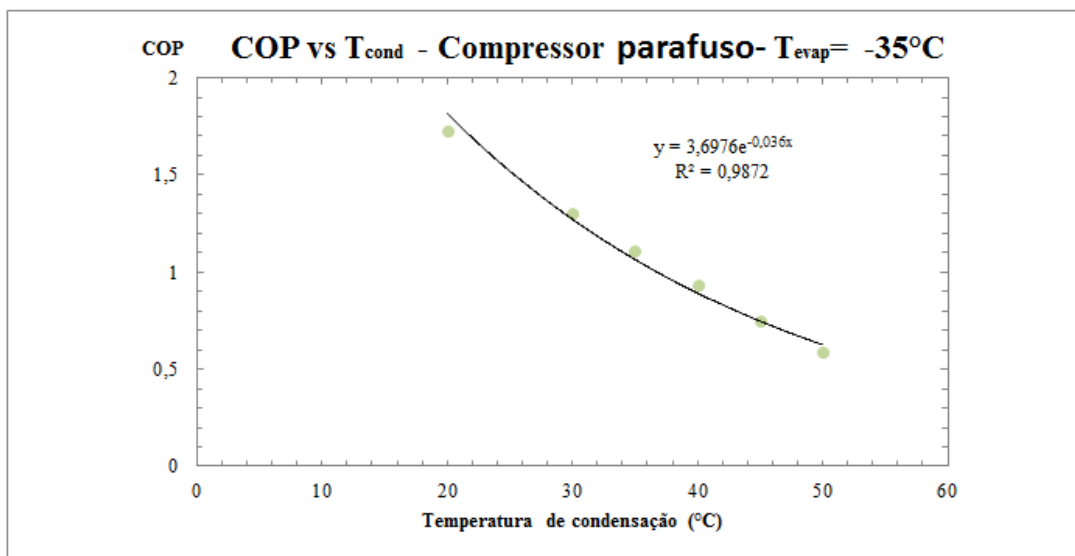


Figura 57 - Correlação obtida para o COP utilizando um compressor do tipo parafuso em função da temperatura de condensação para o circuito de negativos.

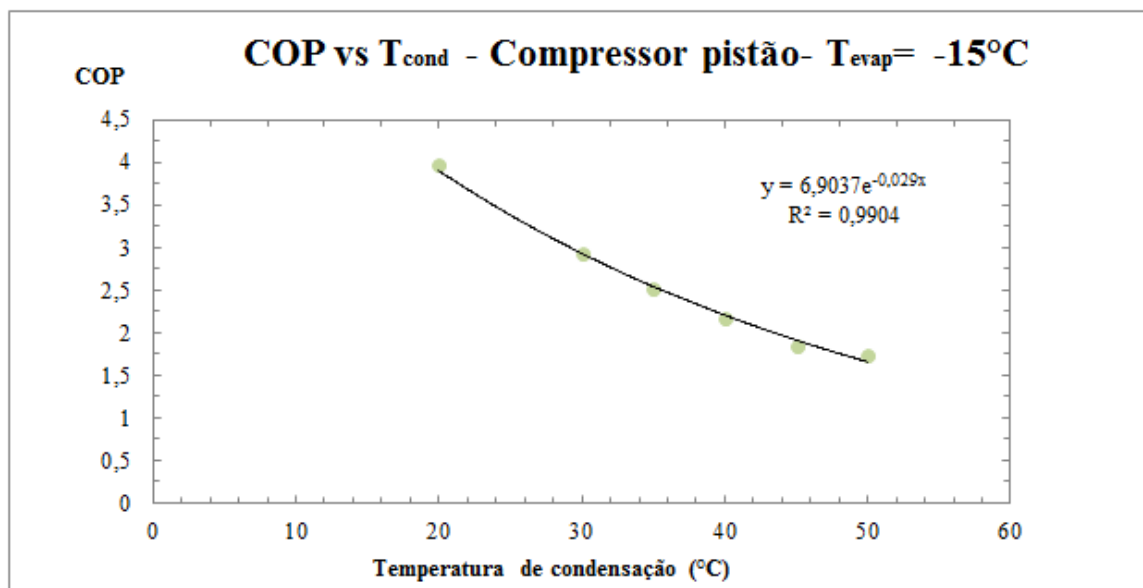


Figura 58 - Correlação obtida para o COP utilizando um compressor do tipo pistão em função da temperatura de condensação para o circuito de positivos.

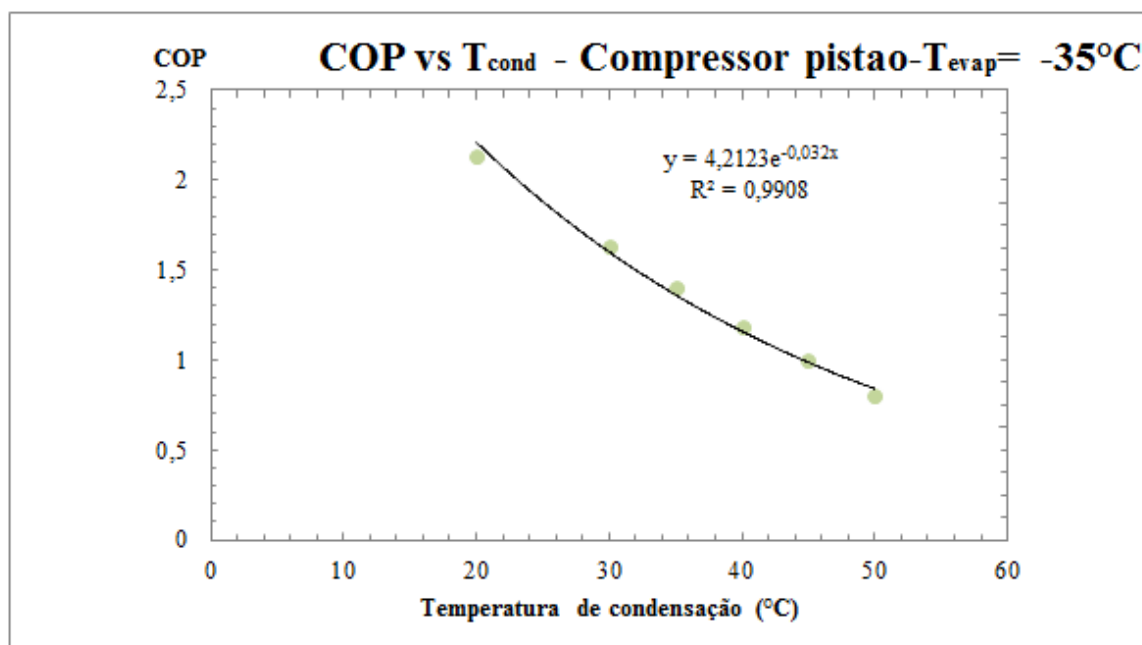


Figura 59 - Correlação obtida para o COP utilizando um compressor do tipo pistão em função da temperatura de condensação para o circuito de negativos.

### Cálculo da eficiência do condensador

Para o cálculo da eficiência do condensador foi utilizado o *software* da “Centauro”, fabricante mais comum de condensadores utilizados em instalações frigoríficas. Do mesmo modo que os compressores, selecionando um qualquer modelo de condensador, obtém-se várias eficiências em função de um  $\Delta T$ . O  $\Delta T$  corresponde à diferença entre a temperatura de condensação e a temperatura exterior. Similarmente aos casos acima obteve-se a correlação representada na Figura 60. Tal como no caso dos compressores, a eficiência do condensador não sofre variações significativas de modelo para modelo.

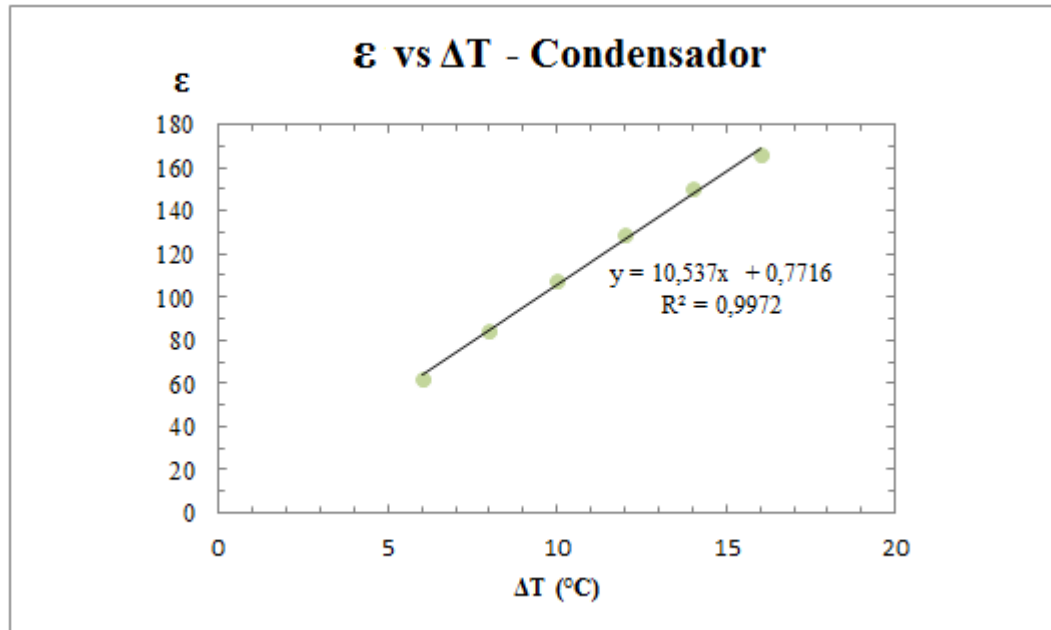


Figura 60 - Correlação obtida para a eficiência de um condensador em função do  $\Delta T$ .